

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO CEZAR MELLO MATTOS HABIB

**TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO DE ISOLANTES TÉRMICOS
NA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES: ESTUDO DE CASO DA LÃ
DE ROCHA NA ZONA BIOCLIMÁTICA 1 DO BRASIL**

CURITIBA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO CEZAR MELLO MATTOS HABIB

**TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO DE ISOLANTES TÉRMICOS
NA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES: ESTUDO DE CASO DA LÃ
DE ROCHA NA ZONA BIOCLIMÁTICA 1 DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, na área de concentração Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção de Mestre em Engenharia de Construção Civil.

Prof. Dr. Ing. Aloísio L. Schmid

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

RICARDO CEZAR MELLO MATTOS HABIB

TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO DE ISOLANTES TÉRMICOS NA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÕES: ESTUDO DE CASO DA LÃ DE ROCHA NA ZONA BIOCLIMÁTICA 1 DO BRASIL

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Aloisio Leoni Schmid

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
da UFPR

Examinadores:

Prof. Dr. Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
da UFPR

Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
da UFPR

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera

Departamento de Engenharia Ambiental da UFPR

Curitiba, 08 de abril de 2014.

Aos meus pais, Ilda e Raif (em memória) por tudo
o que tenho.

Aos meus filhos Victor Hugo, Daniel Jorge e
Fernando pelo apoio durante todo o processo.

À Laura minha esposa pelo suporte incondicional
desde o início do mestrado.

À minha irmã Janice, meu cunhado Enrico e meu
sobrinho Adriano, pelo suporte durante toda a
jornada.

AGRADECIMENTOS

Em especial, ao professor e amigo Aloisio Leoni Schmid, que na qualidade de orientador foi incansável em suas observações, orientações e críticas, sempre oportunas e como amigo, companheiro de viagem, paciente e compreensivo com minhas dificuldades ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Sérgio Fernando Tavares pelas palavras de incentivo em todos os momentos que as dificuldades do caminho se tornaram mais intensas.

Ao professor Marcelo Henrique Farias de Medeiros pelo suporte durante a aplicação de suas disciplinas e pelas orientações durante a elaboração da dissertação.

Ao professor Marcelo Risso Errera pelos comentários e orientações oferecidos durante a banca de apresentação da dissertação, por permitirem melhor exposição do trabalho.

À minha amiga Ziza Nichele pela paciência e orientações prestadas durante toda a realização do mestrado.

Ao meu amigo Peter Lindmaier e sua esposa Fabíola Bruski, pelos longos chats interoceânicos, mesmo com sacrifício de horas de sono advindas da diferença de fusos horários.

À Rockfibras na pessoa dos Eng. Fábio Mota e André de Souza pela inestimável ajuda para a obtenção dos dados necessários à realização do trabalho.

Citar nominalmente as pessoas que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho é sempre uma tarefa arriscada dada a possibilidade de se cometer injustiças. Agradeço então aos meus colegas de mestrado mais próximos pela ajuda em todas as oportunidades estendendo minha gratidão àqueles que por omissão não citei.

Alexandre Bessa Martins Alves

Fernanda Pereira Grein

José Edwalto de Lima Junior

Marina Millani Oba

Neilor de Carvalho Paes

Paula Regina Mendes Grunberg

RESUMO

A preocupação com o incremento da necessidade de energia no Brasil e no mundo tem sido uma constante. Parte dessa energia é de fontes não renováveis, agravando o problema a médio e longo prazo. A Europa já utiliza corriqueiramente isolantes térmicos no envelope das edificações visando reduzir o consumo de energia de aquecimento que representa cerca de 60% do consumo de energia durante o ciclo de vida construção. O trabalho teve como objetivo estudar o tempo de retorno energético da lã de rocha através da verificação do desempenho energético da residência padrão R1-N da ABNT (2006) que recebeu o nome de modelo (A). Foi feita a comparação com os modelos (B), (C) e (D). O modelo (B) teve acréscimo de revestimento de lã de rocha nas paredes do envelope, revestidas com gesso cartonado com pintura PVA. O modelo (C) recebeu acréscimo do mesmo revestimento, no teto do modelo (B). Já o modelo (D) teve as esquadrias padrão do modelo (C) substituídas por esquadrias de alumínio com vidro duplo preenchido com argônio. Os dados permitem inferir que a aplicação da lã de rocha no envelope da edificação padrão R1-N mostrou-se viável em termos de tempo de retorno da energia adicional incorporada.

Palavras-chave: lã de rocha, energia Incorporada, energia operacional, economia de energia, payback.

ABSTRACT

The concern with the increasing need for energy in Brazil and the world has been a constant. Some of that energy is not renewable, exacerbating the problem in the medium and long term. Europe already routinely used in thermal insulation of the building envelope to reduce energy consumption of heating which represents about 60% of energy consumption during the life cycle of construction. The work aimed to study the energy payback time of rockwool by verifying the energy performance of the standard residence R1-N ABNT (2006), which received the name of model (A). It was made a comparison with the models (B), (C) and (D). The model (B) had an increase of rock wool lining the walls of the envelope coated with plasterboard painted with PVA. The model (C) received the same extra coating on the roof of the model (B). The model (D) had windows of the standard model (C) replaced by aluminum frames with double glazing filled with argon. The data allow us to conclude that the application of rock wool in the building envelope of the standard R1-N was feasible in terms of time to return the built-in additional energy.

Keywords: Rockwool, embodied energy, operational energy, energy saving, payback.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Espessura do isolamento aplicada em paredes | 29 |
| Figura 2 - Modelo de construção hierárquica | 36 |
| Figura 3 – Modelo do AHP utilizado na dissertação | 43 |
| Figura 4 – Consumo primário de energia por fonte e setor | 48 |
| Figura 5 – Fontes de energia nos EUA | 49 |
| Figura 6 – Produção de energia primária | 50 |
| Figura 7 – Consumo final por fonte | 50 |
| Figura 8– Fontes de energia no Brasil | 51 |
| Figura 9 – Matriz energética Brasil x EUA..... | 52 |
| Figura 10 – Ciclo de vida do berço ao túmulo da placa de lã de rocha | 55 |
| Figura 11 – Fábrica Rockfibras em Boituva – SP | 62 |
| Figura 12 – Aspecto geral da indústria..... | 66 |
| Figura 13 – Caçamba com os agregados, subindo para descarga no forno | 67 |
| Figura 14 – Saída da rocha fundida, sobre os rolos centrífugos. | 67 |
| Figura 15 – Parte inferior do forno..... | 67 |
| Figura 16 – Vista da entrada da caixa onde os filamentos de lã de rocha entram e são pulverizados com o aglomerante para em seguida serem calandrados | 67 |
| Figura 17 – Após sair da caixa de colocação do aglomerante e entrar na calandra para a produção da lã com as espessuras comerciais a manta é aparada lateralmente dos dois lados, deixando as rebarbas que são reaproveitadas no processo | 68 |
| Figura 18 – Esquema da produção de lã de rocha..... | 68 |
| Figura 19 – Projeto da edificação padrão R1-N | 75 |
| Figura 20 – Vista em perspectiva da parede utilizada no padrão R1-N | 77 |
| Figura 21 – Incremento % por modelo | 82 |
| Figura 22 – Comparativo entre os tipos de energia..... | 88 |
| Figura 23 – Quantidade de energia necessária à manutenção do diferencial de temperatura | 89 |
| Figura 24 – Quantidade de energia..... | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Valores-U típicos para envelopes de construções atuais em vários países europeus | 30 |
| Tabela 2 - Priorização e Julgamentos de valor | 33 |
| Tabela 3 - Índice de aleatoriedade | 34 |
| Tabela 4 – Características dos materiais isolantes | 44 |
| Tabela 5 – Índices HMIS dos materiais pesquisados | 44 |
| Tabela 6 - Regra de três do índice EPI | 44 |
| Tabela 7 – Pesos atribuídos aos riscos..... | 45 |
| Tabela 8 – Demonstrativo dos impactos Ambientais e demanda de energia primária para 1 m ² de placa de lã de rocha com 50mm de espessura..... | 54 |
| Tabela 9 - Materiais do lote para produção da placa por unidade funcional. | 56 |
| Tabela 10 - Entradas para produção da placa por unidade funcional | 57 |
| Tabela 11 - Energia de matéria-prima para materiais por unidade funcional | 57 |
| Tabela 12 – Distancias de transporte associadas à placa da lã de rocha..... | 58 |
| Tabela 13 - Indicadores de inventário de ciclo de vida da placa | 59 |
| Tabela 14 – Resultados da fase de produção (detalhado)..... | 61 |
| Tabela 15 - Entradas para produção da placa por unidade funcional | 65 |
| Tabela 16 – Consumo energético associado aos meios de transporte | 66 |
| Tabela 17 – Entradas e saídas do portão ao portão, para 1m ² de placa..... | 69 |
| Tabela 18 – Insumos utilizados na produção de lã de rocha e distâncias..... | 71 |
| Tabela 19 – Combustíveis utilizados na produção de lã de rocha e distâncias | 71 |
| Tabela 20 - Cálculo da porcentagem de janelas de chapa e de alumínio | 73 |
| Tabela 21 - Cálculo da porcentagem de esquadria em relação ao vidro nas janelas..... | 73 |
| Tabela 22 - Quantitativo das superfícies da edificação R1-N..... | 75 |
| Tabela 23 – EI nos elementos construtivos do modelo (A) | 79 |
| Tabela 24 – EI nos elementos construtivos do modelo (B) | 80 |
| Tabela 25 – EI nos elementos construtivos do modelo (C) | 80 |
| Tabela 26 – EI nos elementos construtivos do modelo (D) | 81 |
| Tabela 27 - Resumo da EI para cada um dos modelos | 82 |
| Tabela 28 – Dados do envelope com valores-U..... | 83 |
| Tabela 29 – EO do modelo (A)..... | 85 |
| Tabela 30 – EO do modelo (B)..... | 85 |

| | |
|--|----|
| Tabela 31 – EO do modelo (C)..... | 86 |
| Tabela 32 – EO do modelo (D)..... | 87 |
| Tabela 33 - Resumo da EO para cada um dos modelos..... | 88 |
| Tabela 34 - Resumo da EI e EO para cada um dos modelos | 89 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Fábrica Rockfibras em Guararema – SP..... | 63 |
| Quadro 2 - Elementos construtivos que compõem as superfícies do invólucro da edificação R1-N..... | 72 |
| Quadro 3 – Dados de valor-U utilizados nos cálculos..... | 78 |
| Quadro 4 – Elementos que compõe o invólucro..... | 83 |
| Quadro 5 – Exemplo da etiqueta do HMIS no quesito <i>Health</i> (saúde), <i>Flammability</i> (inflamabilidade), <i>Physical Hazard</i> (risco físico) e <i>Personal Protection</i> (EPI)... | 109 |
| Quadro 6 – Quadro com os índices de proteção pessoal – EPI..... | 110 |
| Quadro 7 – Quadro de classificação do índice <i>Health</i> (saúde) do HMIS. | 111 |
| Quadro 8 - Quadro de classificação do índice <i>Flammability</i> (inflamabilidade) do HMIS. | 111 |
| Quadro 9 - Quadro de classificação do índice <i>Physical Hazard</i> (risco físico) do HMIS. | 111 |

LISTA DE SIGLAS

ACVE - Análise do Ciclo de Vida Energético.
AHP - *Analytical Hierarchy Process*.
DEP – Demanda de Energia Primária.
EI – Energia Incorporada.
EO – Energia Operacional.
EP - Eutrofização Potencial.
EPI – Equipamento de proteção Individual.
EUA - Estados Unidos da América.
Eurima – European Insulation Manufactures Association.
HMIS – *Hazardous Material Identification System*,.
NAIMA – North American Insulation Manufacturers Association.
NFPA - National Fire Protection Association.
NPCA - National American Coating Association.
OSHA - Occupational Safety and Health Administration.
PAG - Potencial de Aquecimento Global,.
SIMP – Sistema de Identificação de Materiais Perigosos.
TRACI – Toll for reduction and assessment and other Environmental Impacts.
US EPA – United States Environmental Protection Agency.
VOC – Volatile Organic Carbons.
XPS - Poliestireno extrudado.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| TERMO DE APROVAÇÃO | iii |
| Agradecimentos | v |
| RESUMO..... | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | viii |
| LISTA DE TABELAS | ix |
| LISTA DE QUADROS | xi |
| LISTA DE SIGLAS | xii |
| SUMÁRIO..... | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1. PROBLEMA DE PESQUISA | 19 |
| 1.2. JUSTIFICATIVAS..... | 19 |
| 1.2.1. Sociais | 19 |
| 1.2.2. Ambientais | 20 |
| 1.2.3. Econômicas | 20 |
| 1.2.4. Tecnológicas..... | 20 |
| 1.3. DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE ANÁLISE | 21 |
| 1.3.1. Unidade de análise | 21 |
| 1.3.2. Delimitação da pesquisa..... | 21 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 2.1. HISTÓRIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO | 22 |
| 2.2. Energia incorporada na lã de rocha nos Estados Unidos e Brasil..... | 25 |
| 2.3. Energia Incorporada nos materiais isolante térmicos..... | 28 |
| 2.4. DETERMINAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE DE MELHOR DESEMPENHO. | 31 |
| 2.5. PROCESSO E SELEÇÃO DOS ISOLANTES TÉRMICOS..... | 32 |
| 2.6. OS PRINCÍPIOS BÁSICOS DO AHP | 32 |
| 2.7. CONSTRUÇÃO DA HIERARQUIA DO AHP..... | 32 |
| 2.8. DEFINIÇÃO DA PRIORIZAÇÃO E JULGAMENTOS DE VALOR DO AHP | 33 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.9. | ELEMENTOS DE UMA HIERARQUIA NO AHP | 35 |
| 2.9.1. | Estruturação da hierarquia..... | 35 |
| 2.10. | ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS UTILIZADAS | 36 |
| 2.10.1. | Lã de rocha | 36 |
| 2.10.2. | Lã de vidro | 37 |
| 2.10.3. | Poliestireno expandido..... | 37 |
| 2.10.4. | Poliestireno extrudado | 37 |
| 2.10.5. | Poliuretano..... | 37 |
| 2.11. | ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS UTILIZADAS..... | 38 |
| 2.11.1. | HMIS | 38 |
| 2.11.2. | Densidade ou massa específica | 40 |
| 2.11.3. | Temperatura máxima | 40 |
| 2.11.4. | Coeficiente de condutividade térmica | 40 |
| 2.11.5. | Energia incorporada..... | 40 |
| 2.11.6. | Custo | 41 |
| 3. | METODOLOGIA..... | 42 |
| 3.1. | APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA..... | 43 |
| 3.2. | MODELAGEM DO PROBLEMA..... | 43 |
| 3.2.1. | HMIS..... | 44 |
| 3.3. | ISOLANTES TÉRMICOS | 45 |
| 3.4. | MATRIZ ENERGÉTICA..... | 45 |
| 3.4.1. | Matriz energética ns Estados Unidos | 46 |
| 3.4.2. | Matriz energética no Brasil | 49 |
| 3.4.3. | Comparativo da matriz energética americana com a brasileira | 51 |
| 3.5. | A ENERGIA INCORPORADA NA LÃ DE ROCHA NOS ESTADOS UNIDOS | 52 |
| 3.5.1. | Unidade funcional e fluxo de referência..... | 54 |
| 3.5.2. | Visão geral do ciclo de vida | 55 |
| 3.5.3. | Descrição do fluxo de processo..... | 56 |
| 3.5.4. | Resultados do inventário de indicadores | 58 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.6. | A ENERGIA INCORPORADA NA LÃ DE ROCHA NO BRASIL | 61 |
| 3.6.1. | Rockfibras isolantes térmicos e acústicos | 62 |
| 3.6.2. | Visão geral do ciclo de vida | 64 |
| 3.6.3. | Descrição do fluxo de processo | 64 |
| 3.6.4. | Inventário do portão ao portão na indústria | 68 |
| 3.6.5. | Resultados do inventário de indicadores | 70 |
| 3.7. | ENERGIA DE OPERAÇÃO | 71 |
| 3.7.1. | A cidade de Curitiba - contextualização | 71 |
| 3.7.2. | Composição do invólucro | 72 |
| 3.7.3. | Variações das características do invólucro da edificação | 73 |
| 3.7.4. | Quantitativo das superfícies | 74 |
| 3.7.5. | Energia Incorporada | 76 |
| 3.7.6. | Transmitância térmica | 76 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 78 |
| 4.1. | DADOS PRELIMINARES | 78 |
| 4.2. | QUANTIDADE DE ENERGIA INCORPORADA EM CADA UM DOS MODELOS | 78 |
| 4.2.1. | Modelo (A) edificação R1-N em sua condição original de construção | 79 |
| 4.2.2. | Modelo (B) com a incorporação de lã de vidro nas paredes externas | 79 |
| 4.2.3. | Modelo (C) incorporação de lã de rocha nos tetos | 80 |
| 4.2.4. | Modelo (D) substituição das esquadrias externas por esquadrias com vidro duplo. 80 | |
| 4.2.5. | Resumo da EI dos modelos (A), (B), (C) e (D) | 81 |
| 4.3. | QUANTIDADE DE ENERGIA OPERACIONAL EM CADA UM DOS MODELOS | 82 |
| 4.3.1. | Modelo (A) edificação R1-N em sua condição original de construção | 84 |
| 4.3.2. | Modelo (B) com a incorporação de lã de vidro nas paredes externas | 85 |
| 4.3.3. | Modelo (C) incorporação de lã de rocha nos tetos | 85 |
| 4.3.4. | Modelo (D) substituição das esquadrias externas por esquadrias com vidro duplo. 86 | |

| | |
|--|------------|
| 4.3.5. Resumo da EO dos modelos (A), (B), (C) e (D)..... | 87 |
| 4.4. COMPARATIVO ENTRE EI NOS EUA E NO BRASIL..... | 88 |
| 4.5. CONSUMO DE ENERGIA DOS QUATRO MODELOS..... | 88 |
| 4.5.1. Resumo da EI e EO dos modelos (A), (B), (C) e (D) | 89 |
| 4.6. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AO LONGO DO CICLO DE VIDA..... | 90 |
| 4.7. TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO | 90 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 92 |
| 5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 92 |
| REFERÊNCIAS..... | 94 |
| ANEXOS | 108 |

1. INTRODUÇÃO

O setor de construção civil e a indústria são um dos maiores exploradores dos recursos naturais, tanto renováveis como não renováveis, afetando negativamente o meio ambiente da terra de acordo com as pesquisas de Spence e Mulligan (1995) e Holtzhausen (2007).

À medida que a utilização de energia no setor da construção civil dos edifícios é responsável por uma significativa parte do uso total de energia do mundo e das emissões dos gases de efeito estufa, existe uma procura para melhorar a eficiência energética das edificações. Desse modo foram introduzidos o conceito de casas passivas¹ e edifícios de emissão zero². A fim de atender a demandas de melhoria da eficiência energética, o isolamento térmico de edifícios desempenha um papel importante. Para atingir melhor resistência térmica possível, novos materiais de isolamento e soluções, com valores de condutividade térmica baixa foram e estão sendo desenvolvidos, além de utilizar materiais de isolamento tradicional com o incremento da espessura nas envoltentes³ dos edifícios. No entanto, envelopes de construção muito espessos não são desejáveis devido à várias razões, entre elas os problemas da redução da área útil, volume de transporte, restrições arquitetônicas e outras limitações, além do uso de materiais e técnicas de construção existentes (JELLE, 2011).

Num futuro próximo, os novos edifícios deverão ser construídos buscando atender o conceito de edificações passivas. As casas e edifícios existentes deverão ser reformados visando atender as necessidades padrão de baixo consumo de energia das construções. As novas abordagens para o projeto de eficiência de energia não estão apenas se movendo em direção à redução dos valores-U para conseguir

1 O termo casa passiva, (do alemão – *PassivHaus*), descreve um conceito específico de desempenho energético de edifício. Uma casa passiva é otimizada em seu desempenho térmico, de tal maneira que não precisa de um sistema de aquecimento convencional. A exigência de aquecimento é coberta principalmente por ganhos solares e internos. As perdas de energia por meio de ventilação são significativamente reduzidas através da utilização de uma ventilação controlada dos espaços habitáveis, combinados com um sistema de recuperação de calor de alta eficiência (WD RE-THINKING LTD., 2010).

2 Um edifício de energia zero, é um edifício com consumo zero de energia líquida, ou seja, a quantidade total anual de energia utilizada pelo edifício é aproximadamente igual à quantidade de energia renovável criado no local. Estes edifícios ainda produzem gases de efeito estufa, porque em dias nublados, à noite, quando o sol não está visível e em dias de inverno curto, a rede elétrica convencional ainda é a principal fonte de energia. Devido a isso, a maioria dos edifícios de energia zero líquida ainda recebe metade ou mais de sua energia a partir da rede (WIKIPEDIA, 2014).

3 A envoltente do edifício (do inglês *building envelope*) inclui todos os componentes de construção que separam o interior do exterior. Edifício. Os envelopes incluem o exterior paredes, fundações, telhado, janelas e portas. O desempenho da envoltente do edifício é impactado por um número de subsistemas, tais como aquecimento, arrefecimento e equipamentos de ventilação, canalizações e sistemas elétricos. A interação dos subsistemas com os componentes da envoltente do edifício, bem como algumas atividades dos ocupantes, pode afetar o desempenho do envelope da edificação

um menor consumo de energia, mas também o desenvolvimento e a utilização de materiais naturais e locais de construção. Nos últimos anos, o segmento de proteção térmica em edifícios vem concentrando-se mais sobre as propriedades ecológicas e consciência ambiental, não se limitando apenas à economia de energia, mas também à busca pela construção ecologicamente correta, ou seja, redução de entrada de energia, produção ou consumo de recursos e poluição, que devem ser uma parte da produção, instalação e utilização de materiais de isolamento (KORJENIC *et al.*, 2011).

Trinta anos após a introdução do isolamento térmico compulsório na maioria dos países europeus, os materiais de isolamento ainda são a principal ferramenta para a melhoria do comportamento energético de um edifício. A utilização de materiais de isolamento aumentou, tanto na quantidade de edificações isoladas, como nos padrões mínimos de isolamento exigidos pelos regulamentos daqueles países. Este grau de isolamento necessário se torna claro quando se consideram os valores-U previstos em vários países da Europa para a envolvente do edifício (PAPADOPOULOS, 2005).

Em 1987, a Comissão Brundtland (2010) definiu sustentabilidade como "o desenvolvimento que satisfaz a necessidade do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades". Para os materiais de isolamento, isto significa que eles devem ser produzidos e utilizados de maneira que economizem o máximo de recursos com o menor impacto possível sobre o meio ambiente ao longo do ciclo de vida completo do produto. A energia mais sustentável é a energia economizada.

A parte mais importante da estratégia energética de um país é a economia de energia. Devido ao uso limitado de fontes de energia e poluição ambiental provenientes do uso dos combustíveis, essa economia tornou-se obrigatória. Esses dados mostram sua importância relativa aos aspectos ambientais notadamente sobre a poluição, pois, a quantidade de dióxido de carbono, dióxido de enxofre diminuem com a redução da utilização de energia. Um dos principais fatores que determinam as políticas energéticas dos países é a produção econômica de energia limpa. Estudos realizados em 2005, apontam que isolamento térmico com lã de rocha e poliestireno expandido podem produzir uma economia de energia até US\$ 21 por m² de área de parede. Períodos de retorno de 12 meses a 20 meses para a lã de rocha e 15 meses a 28 meses para o poliestireno expandido. Os sistemas de isolamento com lã de rocha, lã de escória e fibra de vidro são tecnologias comprovadas de eficiência energética, que após a produção inicial, não necessitam de energia para economizar

energia. O isolamento começa a trabalhar a partir do momento em que é instalado, tem a duração de vida do edifício, e se não for danificado, não requer manutenção. O isolamento reduz custos médios de aquecimento e resfriamento da edificação em cerca de 20% (NAIMA, 1995).

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Qual é o tempo de retorno (*payback*) energético da lã de rocha na climatização de edificações na zona bioclimática 1 do Brasil

Hipótese

A utilização de lã de isolamento térmico nas paredes do envoltório e tetos apesar do incremento de energia incorporada pode ser viável para reduzir a energia operacional.

1.2. JUSTIFICATIVAS

Esta pesquisa justifica-se em face da necessidade crescente de energia para aquecimento e refrigeração, principalmente devido à exploração dos recursos naturais.

1.2.1. Sociais

O isolamento térmico é uma das formas mais eficazes de economia de energia utilizada para o aquecimento e refrigeração de edifícios. Em um clima moderado, aquecer o ar no interior dos edifícios, especialmente no inverno, mas também em períodos de transição (outono e primavera) é significativo na medida em que a demanda de energia térmica é necessária. Portanto, a determinação e escolha da melhor espessura do isolamento é o principal objetivo de muitos trabalhos de pesquisa (AL-HOMOUD, 2005).

Durante a primeira década do século XXI, o consumo de energia vem aumentando rapidamente devido ao aumento crescente da população, urbanização, migração para as grandes cidades e a melhoria da qualidade de vida. Esse consumo é distribuído entre quatro principais setores: industrial, construção (residencial/comercial), transporte e agricultura (BOLATTÜRK, 2008).

1.2.2. Ambientais

A indústria da construção não é imune a esta realidade e enormes esforços têm sido realizados no sentido de se buscar alternativas de materiais de construção sustentáveis e métodos de baixa tecnologia que resultem em uma construção mais sustentável e acessível, complementada com o conforto e padrões exigidos atualmente. As emissões de CO₂ para a atmosfera, energia e água consumidos são alguns parâmetros que têm um impacto significativo nesta equação. A reutilização, optando por materiais de construção renováveis, locais e abundantes, o *retrofit*, elegendo métodos de baixa tecnologia e técnicas são algumas práticas que deram bons resultados neste contexto (KHEDARI *et al.*, 2008).

1.2.3. Econômicas

A geração de energia elétrica com bases fósseis tem sido predominante nos países denominados desenvolvidos. Essa modalidade de geração tem alta produção de gases do efeito estufa. Além disso, a maior parte destes se localiza em regiões de inverno rigoroso. Devido a este fato, muitas pesquisas científicas sobre consumo energético nas edificações têm origem no seu uso final. Na Noruega, a operação de edificações consome 90% da energia ofertada no país. Como consequência, a maior parte dessas pesquisas tem como foco a redução do consumo operacional, particularmente o condicionamento de ambientes (WINTHER e HESTNES, 1999).

Em muitos países, o consumo de energia das construções gira em torno de 40% das demandas energéticas globais e a necessidade de energia para aquecimento e arrefecimento de um edifício é de aproximadamente 60% do total de energia consumida nos edifícios, o que representa o maior percentual de utilização de energia (MELO e LAMBERTS, 2009).

1.2.4. Tecnológicas

Em 2001, os EUA consumiram no setor residencial cerca 18,6 EJ⁴ de energia, tendo sido responsáveis pela emissão de 1,155 Gt de CO₂ (EIA, 2011).

Estes números representam cerca de 18% das necessidades energéticas e 20% das emissões nacionais de CO₂ (EIA, 2006). O aquecimento e arrefecimento

⁴ O exajoule é uma medida de energia equivalente a 10¹⁸ joules, ou 10¹⁵ Btu, comumente utilizada para medir o consumo anual de energia (WORD INFO, 1999)

foram responsáveis por 41% da energia primária utilizada e 36% das emissões de CO₂ no setor residencial, representando, em ambos os casos, cerca de 7% dos valores nacionais naquele país. Enquanto a importância do aquecimento e refrigeração residencial é bem compreendida, menos óbvias se tornam os impactos ambientais associados ao processo de fabricação e ao transporte, reciclagem ou eliminação de materiais utilizados na construção, renovação e manutenção (UPTON *et al.*, 2008).

O emprego de isolamento térmico é uma das maneiras mais eficazes de conservação de energia para aquecimento e refrigeração. Portanto, a escolha de um bom material de isolamento e a determinação da espessura ideal de isolamento é de vital importância para as edificações (YU *et al.*, 2009).

1.3. DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE ANÁLISE

1.3.1. Unidade de análise

A unidade deste trabalho são os materiais isolantes térmicos utilizados em edificações.

1.3.2. Delimitação da pesquisa

A presente pesquisa apresenta as seguintes delimitações:

O estudo busca caracterizar a EI – Energia Incorporada dos principais materiais isolantes térmicos utilizados no Brasil;

O estudo comparativo dos materiais encontrados no exterior e no Brasil poderá apresentar dificuldades inerentes aos processos de aplicação, utilização e fabricação.

A população a ser estudada é a da lã de rocha utilizada nos Estados Unidos e no Brasil para aplicação em edificações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica busca o estado da arte sobre isolantes térmicos, EI e EO nos isolantes térmicos além dos aspectos considerados de relevância para a elaboração da metodologia a ser proposta.

Foi realizada uma breve descrição da produção da lã de rocha. Foi discutido o conceito de EI do berço ao Portão (oriundo do inglês *Cradle to Gate*). Foram estudadas as origens históricas, a elaboração da terminologia utilizada no cálculo da EI, as estruturas usuais empregadas além da discussão sobre algumas aplicações.

2.1. HISTÓRIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO

Close (1947) *apud* Bynum e Bynum (2000) relata em sua pesquisa que os historiadores acreditam que os antigos gregos e romanos descobriram o amianto e encontraram muitos usos para ele por causa de sua resistência ao calor e ao fogo. Os romanos ainda utilizaram cortiça para isolamento em sapatos, a fim de manter seus pés quentes. Plínio, no século I referiu-se a utilização de cortiça como um material de isolamento para coberturas. Os primeiros habitantes de Espanha revestiram suas casas de pedra com cortiça e os nativos norte-africanos usaram cortiça misturada ao barro para as paredes de suas cabanas. Com o desenvolvimento da tecnologia, as inovações para melhorar o conforto dos seres humanos também aconteciam. A introdução da lareira e da chaminé pelos noruegueses e habitantes da Islândia durante os séculos XII e XIII promoveu o controle do calor artificial. A necessidade logo evoluiu, tendo tornado importante não só manter o calor fora mas também no interior das habitações. No norte da Europa foram construídas casas com um teto de até dois pés (60 cm) de espessura, de palha trançada além de paredes de barro e palha. Casas de colonizadores espanhóis no sudoeste dos Estados Unidos, onde as temperaturas atingiam 120 a 140 °F (49°C a 60°C), permaneciam relativamente frias devido às paredes de palha de barro de vários metros de espessura (ARQUITETURA SUSTENTÁVEL, 2014).

Os primeiros povos pré-históricos construíram habitações temporárias com os mesmos materiais utilizados para a roupa. Os materiais mais comuns eram as peles de animais, lã e produtos vegetais como cana, linho ou palha, mas a sua vida era limitada. Posteriormente devido ao estilo de vida de colonizadores e o desenvolvimento da agricultura eles precisavam de materiais mais duráveis para a

habitação, como pedra, madeira e terra. As casas de terra e grutas foram construídas ao mesmo tempo e parece que eram muito populares à vista de seus benefícios inerentes. A execução era barata e uma cobertura de terra assegurava uma excelente proteção contra animais selvagens, fogo e durante os períodos de conflito. A utilização da terra conferiu às casas um bom isolamento térmico, pois, devido à sua alta densidade, a temperatura no interior altera-se muito lentamente. Este fenômeno é chamado de atraso térmico e é por isso que a cobertura de terra, mantém o interior quente no inverno e fresco no verão. Pode-se encontrar construções semelhantes em zonas climáticas frias como Escandinávia, Islândia, Rússia, Groenlândia e Alasca (BOZSAKY, 2010).

Condições diferenciadas de conforto / desconforto térmico, poluição do ar, chuvas intensas, inundações e desmoronamentos das vertentes dos morros – eventos de grande custo social- estão relacionadas com a produção do clima urbano, que é resultado da ação do homem sobre a natureza (LOMBARDO, 1985).

Os processos de urbanização existentes e a configuração das cidades traduzem o desenvolvimento de relações complexas e de resultados negativos para o convívio humano/social na cidade. O Brasil, incluído nesta condição de desenvolvimento, apresenta uma dinâmica de urbanização que resulta na segregação social e espacial e na exclusão de grande parte de sua população (SANTOS, 1994).

Climas urbanos inadequados significam perda da qualidade de vida para uma parte da população, enquanto para outra, conduzem ao aporte de energia para o condicionamento térmico das edificações. Em consequência disso, aumentam as construções de usinas hidrelétricas, termoeletricas ou atômicas, de grande impacto sobre o meio ambiente (LAMBERTS *et al.*, 1997).

Uma vez que a maioria dos materiais de isolamento térmico apresenta fluxo de calor por uma combinação de modos (condução, radiação e convecção) resultando em variação de propriedades de acordo com a espessura do material ou emissão da superfície, a premissa de um único modo de transmissão não é válida. Assim, a expressão aparente está implícita no termo condutividade térmica dos materiais isolantes (PEAVY, 1996).

Hasan (HASAN, 1999) e AL-Sanea (2002) comentam que a utilização de material isolante para diminuir o calor transferido de/para superfícies tem sido a prática durante muitos anos. Preocupações recentes sobre conservação da energia e a consciência de limitados recursos energéticos vêm incentivando a pesquisa sobre o

problema do isolamento térmico.

A maioria dos estudos disponíveis versa sobre a melhor espessura do isolamento dos edifícios, para as aplicações de refrigeração, e para os frigoríficos, devido ao grande potencial de economia energética (BOLATTÜRK, 2006).

Al-Ajlan (2006) comenta em sua pesquisa que o isolamento térmico é considerado um dos meios mais eficazes de conservação de energia em edifícios. A resistência térmica oferecida por uma camada de isolamento aumenta com o aumento da espessura da camada e diminui a condutividade térmica. Muitos tipos de materiais de isolamento estão disponíveis, e diferem no que diz respeito às propriedades térmicas e muitas outras propriedades dos materiais, bem como de custos. Diferentes práticas de isolamento estão disponíveis, dependendo das estruturas globais de paredes e telhados.

O aumento do consumo de energia e os custos relativamente elevados de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, durante a crise econômica mundial denominada de longa depressão que ocorreu entre 1873 e 1896 obrigou as usinas térmicas a reduzir as perdas de calor dos motores a vapor, aparelhos de aquecimento, chaminés e também a construção de estruturas em torno deles. Este e as construções de paredes leves foram algumas das razões pelas quais a arquitetura industrial começou a utilizar materiais de isolamento térmico (TOMLOW, 2007).

Cabeza *et al.* (2010) compararam experimentalmente o desempenho energético dos três materiais típicos de isolamento, poliuretano, poliestireno e lã mineral. Quatro cubículos em forma de casa foram construídos e seu desempenho térmico durante o ano de 2008 e metade de 2009 foi medido sob as condições climáticas prevalentes. Redução de energia de até 64% no verão e até 37% no inverno foram observadas. As reduções oriundas de diferentes materiais de isolamento foram inferiores a 25%, na maioria dos casos.

De acordo com Budaiwi e Abdou (2013) o desempenho térmico da envolvente do edifício depende, em grande parte, da eficácia térmica da camada de isolamento, que é determinado principalmente pelo seu valor- K^5 .

⁵ O coeficiente de condutividade térmica k fornece o fluxo de calor que passa em 1 m² de superfície do material, quando este possui uma espessura de 1 m e é submetido a uma diferença de temperatura de 1 grau entre as suas faces (ARCELOR MITTAL, 2003).

2.2. ENERGIA INCORPORADA NA LÃ DE ROCHA NOS ESTADOS UNIDOS E BRASIL.

Na análise de energia os *inputs* para um sistema são agregados a partir de todas as vias controladas para produzir a EI ou total bruto da exigência de energia. Este enfoque abrange todo o conceito de ciclo de vida, posteriormente, utilizado em estudos de ACV (SLESSER, 1978; 1988). Van Gool (1980) avaliou a energia mínima ("processo" mais "incorporada") necessária para os diferentes tipos de equipamentos de processo químico, muitas vezes chamadas de "unidade de operações".

Para Koskela (1992) a EI é a energia consumida na produção do material.⁴

Boa confiabilidade dos dados, que permitam sua comparação, são vitais para a pesquisa de EI, em parte devido ao incremento da significância da EI no ciclo de vida total de uma edificação (PEARS, 1996; PULLEN, 1996; RAYNOLDS *et al.*, 2000; JOHNSTON *et al.*, 2008).

Uma vez que o consumo de energia tem relação direta com a produção de gases do efeito estufa, mormente o CO₂, os VOC – *Volatile Organic Compounds*, os gases ácidos e outros elementos de poluição do ar, a EI é empregada como um balizador de sustentabilidade das edificações (BUCHANAN e HONEY, 1994; COLE, 1999; FAY *et al.*, 2000; TRELOAR *et al.*, 2001).

Thormark (2002) determinou que a EI de uma casa de baixo consumo de energia poderia ser igual a uma variação de quarenta a sessenta por cento da energia total do ciclo de vida. A EI é considerada como o conjunto dos insumos energéticos para a fabricação de materiais, transporte destes e outros insumos indiretos. Esta ferramenta, quando utilizada, indica, por exemplo, que a EI total, incluindo reformas e manutenção durante a vida útil, pode atingir até 40% do total de energia consumida em um ciclo de vida de 50 anos.

Adalberth (1997), Fay (1999) e Scheuer (2003) comentam que outro tipo de EI é a energia de desconstrução, que é consumida no final do ciclo de vida da edificação através de seu descarte, deposição ou reciclagem. Os insumos diretos são considerados em sua totalidade para fins de demolição ou desmontagem do prédio, além do transporte dos detritos ou materiais para reutilização ou reciclagem. Nestes casos o débito de EI nos materiais reutilizados pode ser contabilizado nas novas edificações que deles fizerem uso.

Venkantarama e Jagadish (2003) definem a EI de um edifício como a energia

total associada à sua produção, isto é aquela necessária para produzir as matérias-primas, processá-las e fabricá-las e se necessário, transportá-las para o local de utilização e aplicá-las.

O setor de construção civil tornou-se, juntamente com o setor industrial o consumidor de energia mundial dominante com 28% do consumo global (SARLOS e DAURIAT, 2003).

Tavares e Lamberts (2004) realizaram pesquisa sobre o consumo energético de edificação residencial para um ciclo de vida de 50 anos. O modelo utilizado na pesquisa foi o H1-2B, consoante com a NBR 12721 (ABNT, 2006), tendo sido calculados os insumos energéticos dos materiais de construção da obra, denominados de EI inicial e dos materiais utilizados em reformas e manutenção, denominados de EI de reposição, além dos consumos de eletricidade, energia de cocção na vida útil denominado de EO – Energia Operacional.

No ano seguinte, Tavares e Lamberts (2005) demonstraram que EI inicial em toda a edificação é da ordem de 218 GJ. Sendo este valor oriundo do cálculo da energia consumida na fabricação dos materiais de construção utilizados, no transporte destes até a obra, nas formas de energia despendidas diretamente na construção, bem como dos desperdícios relativos à técnica construtiva empregada. A EI de reposição total é de 2,9 GJ.

Tavares (2006) comenta que, apesar da importância da energia operacional, a quantificação da EI em uma construção, é também necessária à avaliação dos impactos ambientais. Estes impactos ainda consideram toda a energia utilizada para produzir os materiais de construção necessários à edificação e manutenção do prédio, bem como a energia necessária na demolição, deposição ou reciclagem dos materiais. As energias operacional e incorporada podem ter uma relação mais impactante nas edificações de baixo consumo, seja pela eficiência dos equipamentos utilizados ou pela existência de isolamento térmico.

González e Garcia (2006), afirmaram que os materiais de construção com alta EI podem resultar em mais emissões de dióxido carbono de materiais do que poderiam aqueles com baixa EI.

A energia gasta durante a fase de operação do em arrefecimento e aquecimento, aquecimento de água, iluminação, aparelhos de construção de operação e outras atividades operacionais semelhantes é conhecida como EO. A energia total do ciclo de vida do edifício é constituída por EI e EO (CROWTHER, 1999;

HEGNER, 2007)

Em seu trabalho, Sartori e Hestnes (2007) concluíram que, para um edifício convencional a EI poderia ser responsável por uma variação de dois por cento a trinta e oito por cento da energia total do ciclo de vida e para um edifício de baixo consumo de energia, ela pode variar de nove por cento a quarenta e seis por cento.

Comparada com a EI, a EO constitui uma proporção relativamente maior de energia total do ciclo de vida de um edifício (HEGNER, 2007).

A EI e o carbono estão igualmente sendo vistos como importantes no contexto dos edifícios e materiais de construção (MENZIES *et al.*, 2007).

Hegner (2007), Bisesi, Purcell e Marion (2007) descrevem a EI como uma soma de tipos de energia que estão disponíveis em quantidades limitadas não renováveis.

No entanto, pesquisas da última década, têm reconhecido a importância da EI e indicaram que com o crescente surgimento de mais edifícios energeticamente eficientes, a proporção relativa de EI pode aumentar (FERNANDEZ, 2008; FREY, 2008; PLANK, 2008).

Huberman e Pearmutter (2008) determinaram que a EI num edifício climaticamente sensível na região do deserto de Negev em Israel é de 60 por cento da energia do ciclo de vida total (50 anos de ciclo vida de serviço).

Nebel, Alcorn e Wittstock (2008) citam em seu trabalho que a proporção de EI no ciclo de vida total depende da localização geográfica e clima. Em regiões dominadas pelo aquecimento, a EI representa uma percentagem relativamente baixa da energia de ciclo de vida total, o que pode não ser verdadeiro para uma região onde de clima moderado ou quente.

Black, Ooteghem, Boake (2010) apontaram uma relação entre o consumo de energia nos edifícios e as emissões de gases de efeito estufa, ressaltando assim a importância ambiental da EI. Os mesmos autores citam que apenas a energia que está disponível em uma quantidade limitada deve ser considerada EI. O autor relata o fenômeno da EI para as emissões de gases de efeito estufa, como uma grande fração da energia primária que está disponível em uma quantidade limitada que vem de combustíveis fósseis. Além disso, comenta, que os estudos fornecem suas próprias definições, que diferem de outros estudos semelhantes.

Da mesma forma, Ramesh, Prakash e Shukla (2010) definem EI como a energia utilizada durante a fase de produção de uma edificação ou de seus insumos.

Por outro lado, existem estudos que, exibem falta de precisão e variabilidade, devido ao uso de metodologias inconsistentes para determinar a EI de materiais de construção (DIXIT *et al.*, 2010).

Como os custos energéticos aumentam, o controle do custo de vida vai exigir reduções na demanda energética. Por outro lado, gerir as emissões de gases de efeito estufa produzidos pelo desenvolvimento imobiliário é de fundamental importância para minimizar as alterações climáticas. A ACVE - Análise do Ciclo de Vida Energético assinala estratégias mais adequadas para reduzir as necessidades de energia e as emissões de gases com efeito de estufa. Em edifícios residenciais, esta energia representa entre 30% e 100% do consumo de energia total do ciclo de vida (HAYNES, 2010).

Os edifícios são construídos com uma variedade de materiais de construção, cada um dos quais consome energia em todas as suas fases de produção, uso, demolição e eliminação. Do mesmo modo, cada edifício consome energia durante o seu ciclo de vida em fases, como matéria-prima, extração, transporte, fabrico, montagem, instalação, bem como sua desmontagem, demolição e descarte. A energia é gasta em vários processos de construção de um edifício durante a fase de pré-construção. As fases de pós-construção, tais como renovação, reforma, demolição e descarte também consomem energia. A energia consumida nestas fases do ciclo de vida de uma construção é interpretada coletivamente como EI (DIXIT *et al.*, 2012).

2.3. ENERGIA INCORPORADA NOS MATERIAIS ISOLANTE TÉRMICOS

Uma abordagem sistemática para a otimização da espessura do material isolante foi desenvolvida por Hasan (1999) e aplicada à Palestina, baseada no custo do ciclo de vida. Foram desenvolvidas tabelas genéricas para escolha da melhor espessura do isolamento em função de graus-dias⁶ e resistência térmica de parede. Um material de isolamento deve ser considerado em primeiro lugar pelo seu desempenho térmico e, a menos que outros fatores contextuais sejam aplicados, e só posteriormente, quanto ao seu impacto ambiental.

A evolução que tem ocorrido desde o início da década de 1970 torna-se clara

⁶ Um grau-dia é uma medida de aquecimento ou de arrefecimento. O somatório dos graus-dia de uma data inicial adequada são utilizados para planejar o plantio de culturas e manejo de pragas e tempo de controle de pragas. Os números semanais ou mensais de graus-dia também pode ser usado dentro de uma energia monitorar e orientar esquema para monitorar os custos de aquecimento e refrigeração de edifícios de clima controlado, enquanto que os valores anuais podem ser usados para estimar os custos futuros.

ao se considerar o aumento da espessura do isolamento típico exigido em países europeus ao longo dos anos. Isto é descrito por paredes e telhados conforme ilustrado na Figura 1.

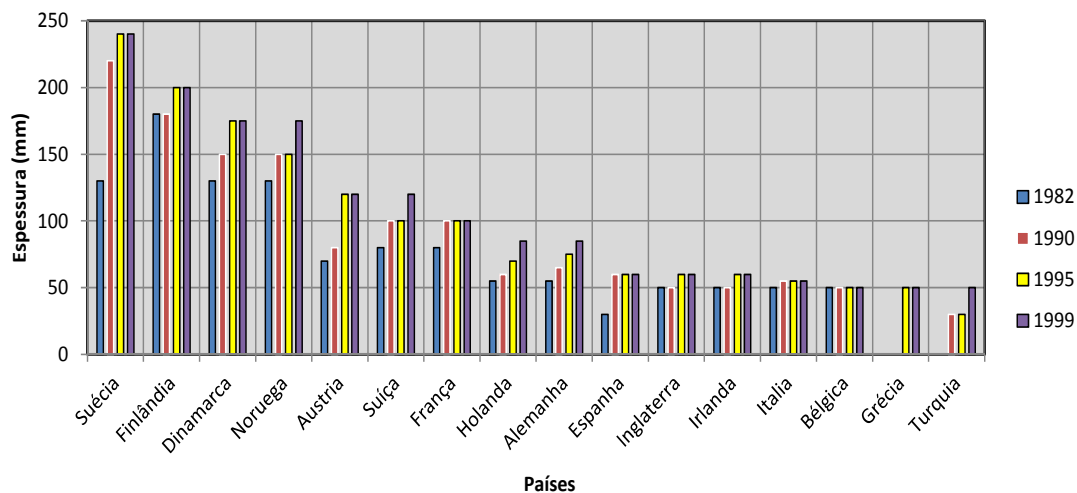


Figura 1 – Espessura do isolamento aplicada em paredes.
Fonte: (ECOFYS, 2002)

Segundo Papadopoulos e Giama (2004) os materiais isolantes podem ser classificados de acordo com a sua estrutura física ou química. O mercado europeu de materiais isolantes é caracterizado pela dominação dos dois primeiros dois grupos de produtos inorgânicos, os materiais fibrosos, lã de vidro e de lã mineral, que representam 60% do mercado e dos materiais orgânicos e espumas, além de poliestireno extrudado e expandido e em menor grau o poliuretano, que representam cerca de 27% do mercado. Todos os outros materiais representavam menos do que 13% juntos. No que diz respeito aos produtores, existem cerca de 250 empresas provedoras do mercado. Nove deles representaram em 2003 mais de 55% da produção anual total.

A Tabela 1 demonstra os valores-U típicos para os envelopes de construções atuais em vários países Europeus. Em 2011 a Eurima – *European Insulation Manufacturers Association* fez publicar uma tabela com dados apurados em abril de 2007, onde constam os requisitos ou recomendações de valores-U em cem cidades de trinta e um países da Europa (EURIMA, 2011). Esses valores são similares aos da Tabela 1.

Tabela 1 - Valores-U típicos para envelopes de construções atuais em vários países europeus

| País | Local de aplicação | | | |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Coberturas | Paredes externas | Pisos térreos | Janelas |
| | W/m ² °C | W/m ² °C | W/m ² °C | W/m ² °C |
| Áustria | 0,2-0,3 | 0,3-0,4 | 0,4-0,5 | 1,0-1,5 |
| Bélgica (Flandres) | 0,4-0,5 | 0,5-0,6 | 0,6-0,6 | 1,5-2,5 |
| Alemanha | 0,2-0,3 | 0,5-0,6 | 0,4-0,5 | 1,0-1,5 |
| Dinamarca | 0,1-0,2 | 0,2-0,3 | 0,1-0,2 | 1,5-2,5 |
| Espanha | 0,6-0,6 | 0,6-0,6 | 0,6-0,6 | 2,5-3,5 |
| Federação Russa | 0,1-0,2 | 0,2-0,3 | 0,1-0,2 | 1,5-3,5 |
| Finlândia | 0,1-0,2 | 0,2-0,3 | 0,2-0,3 | 1,5-2,0 |
| França | 0,2-0,3 | 0,4-0,5 | 0,3-0,4 | 1,5-2,5 |
| Grécia | 0,4-0,5 | 0,5-0,7 | 0,7-1,9 | 2,5-3,5 |
| Holanda | 0,2-0,3 | 0,2-0,4 | 0,2-0,3 | 1,5-2,5 |
| Irlanda | 0,1-0,2 | 0,2-0,3 | 0,2-0,3 | 1,5-2,5 |
| Itália | 0,3-0,4 | 0,4-0,5 | 0,4-0,5 | 2,5-3,5 |
| Lituânia | 0,1-0,2 | 0,2-0,3 | 0,2-0,3 | 1,5-2,5 |
| Noruega | 0,1-0,2 | 0,2-0,3 | 0,1-0,2 | 1,0-1,5 |
| Portugal | 0,6-0,6 | 0,6-0,6 | 0,6-0,6 | 2,0-3,0 |
| Suécia | 0,1-0,2 | 0,1-0,2 | 0,1-0,2 | 1,0-1,5 |
| Suíça | 0,3-0,4 | 0,3-0,4 | 0,6-0,6 | 1,0-1,5 |
| Reino Unido | 0,1-0,2 | 0,3-0,4 | 0,2-0,3 | 1,5-2,5 |

Fonte: (PAPADOPOULOS, 2005)

Os valores de condutividade térmica publicados e aqueles divulgados pelos fabricantes são normalmente avaliados nos laboratórios em condições normatizadas de umidade e temperatura de sorte a permitir análise comparativa do desempenho térmico.

É também de interesse notar que, enquanto em alguns países, principalmente no norte da Europa, os requisitos quase dobraram durante este período, em outros, como na Grécia, os padrões se mantiveram inalterados. É também demonstrado que, a fim de alcançar os padrões mais apropriados, os materiais de isolamento têm de melhorar as suas características. Isto é ainda mais verdade uma vez que os requisitos têm aumentado não só em termos de propriedades térmicas, mas também no que diz respeito à qualidade do ambiente interior e o impacto ambiental. A qualidade de um material isolante depende da sua capacidade de adaptação às formas e tradições nacionais, regionais ou mesmo local de construção. Nesse sentido, o material que é difundido em regiões específicas é raro em outra nos outros, apesar de que, do ponto de vista científico, qualquer material poder ser utilizado no lugar de outro (PAPADOPOULOS, 2005).

Nos países ocidentais e na França em particular, a proporção entre os setores da construção e indústria e os demais setores atinge 45% sendo a maioria deste consumo proveniente de aquecimento e sistemas de ar condicionado que garantam

conforto térmico dos ocupantes. Os prédios com uma estrutura tradicional têm uma grande inércia térmica (armazenagem de calor sensível) e alimentação natural do ar condicionado nos quartos. No setor comercial, a tendência é a diminuição da espessura da parede para reduzir o peso e, em seguida, os custos de transporte e o tempo de construção (AHMAD *et al.*, 2006).

2.4. DETERMINAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE DE MELHOR DESEMPENHO.

Com o aumento do custo da energia e da demanda, o uso de isolamento térmico em edifícios torna-se mais crítico em novas construções, particularmente em climas quentes. A transferência de calor por condução, através da envolvente do edifício representa um componente importante da carga térmica total das edificações. A utilização de isolamento térmico de forma eficiente pode promover uma redução significativa da carga térmica, com a consequente diminuição do consumo geral de energia elétrica.

Abdou e Budaiwi (2005) investigaram a condutividade térmica de materiais de isolamento diferentes, em diferentes temperaturas médias de operação. Os seus resultados indicaram que a temperatura mais elevada conduz a valores-K mais altos e que a maior densidade de isolamento resulta geralmente em menor condutividade térmica. Budaiwi, Abdou e Al-Homoud (2002) investigaram a variação do valor-K de materiais de isolamento em diferentes temperaturas de operação e seu subsequente impacto na carga de resfriamento induzido por envelope. No entanto, não foram considerados o impacto, igualmente fundamental de acumulação potencial de umidade dentro dos isolamentos térmicos investigados e sua subsequente redução da resistência térmica real de isolamento.

Zhang, Zhao e He (2008) mediram as condutividades térmicas eficazes do isolamento fibroso ao longo de uma ampla gama de temperatura (300°- 973°K) e relataram que a condutividade térmica efetiva aumenta não-linearmente com o aumento da temperatura média da amostra.

O índice de consumo de energia para uma unidade unifamiliar em Dhahran, Arábia Saudita, caracterizada por clima quente-úmido foi projetado para ser em torno de 153 kWh/m²/ano. A mesma habitação não isolada consome em média 263 kWh/m²/ano. A redução do índice anual de energia em cerca de 42% comprova a importância e a eficácia do isolamento térmico na construção de envelope (BUDAIWI e ABDU, 2013).

2.5. PROCESSO E SELEÇÃO DOS ISOLANTES TÉRMICOS.

A fim de minimizar o consumo de energia do edifício por meio de proteção térmica de seu envoltório, materiais isolantes com valores de baixa condutividade, têm sido desenvolvidos. A categoria de material isolante mais utilizado é a lã inorgânica fibrosa (lã de vidro e lã de rocha) e as espumas orgânicas (poliestireno expandido e extrudado e, em menor proporção o poliuretano). Os materiais mais usados no mercado europeu são lã mineral e poliestirenos extrudados e expandidos respectivamente (PAPADOPOULOS e GIAMA, 2007).

O levantamento dos elementos utilizados na seleção dos isolantes térmicos foi feito com base em revisões bibliográficas. Os critérios de decisão foram fundamentados no custo e em suas características. O AHP - *Analytical Hierarchy Process* – Processo de Análise Hierárquica foi utilizado para facilitar a determinação do material isolante de melhor desempenho observando-se os critérios e alternativas.

2.6. OS PRINCÍPIOS BÁSICOS DO AHP

O AHP é um processo de organização e tomada de decisões onde diversos componentes podem interferir na decisão e necessitam ser avaliados globalmente, tendo sido desenvolvido para resolver problemas de seleção de uma em um conjunto de alternativas ou opções (MAEDA *et al.*, 2011).

Na construção de uma hierarquia deve-se ter preocupação com o que e onde incluir os elementos a serem analisados. A montagem de hierarquias deve incluir detalhes relevantes que representem o problema da forma mais completa possível, mas não tão completamente para não se perder a sensibilidade de alterar os elementos. Deve-se considerar o ambiente que envolve o problema, identificarem-se as questões ou atributos que contribuem à solução além de identificarem-se os participantes relacionados com o problema (SAATY, 1990a).

2.7. CONSTRUÇÃO DA HIERARQUIA DO AHP

As relações, critérios e alternativas são transformados em valores numéricos e colocados em matrizes de pares recíprocos para calcular as prioridades entre as alternativas. Existem várias formas matemáticas para medir a consistência de uma matriz de pares recíproca. Em uma matriz recíproca positiva, o maior valor próprio é maior ou igual ao de sua ordem. A construção do modelo hierárquico visa facilitar a

compreensão do sistema através da definição do objetivo geral e do agrupamento dos elementos chave, distribuídos em camadas. Se o problema tiver altos níveis de complexidade, serão necessárias várias camadas de critérios ou critérios para definir a escala hierárquica (GOMEZ-RUIZ *et al.*, 2010).

2.8. DEFINIÇÃO DA PRIORIZAÇÃO E JULGAMENTOS DE VALOR DO AHP

De acordo com Saaty (1990a) a avaliação no AHP é feita pela comparação dos critérios aos pares, optando pelos mais significativos. Por ser um método matemático, o AHP necessita utilizar valores numéricos. Na sua falta, podem ser atribuídos pesos, pelo avaliador, de acordo com uma tabela de priorização e julgamento de valor, de sorte a permitir que elementos qualitativos possam ser transformados em quantitativos. Pode-se então, produzir, uma matriz que represente numericamente estes valores através da utilização de uma escala de tradução padronizada representada na Tabela 2.

Tabela 2 - Priorização e Julgamentos de valor

| Escala Verbal | Escala Numérica |
|---|-----------------|
| A tem igual importância que B | 1 |
| A levemente mais importante que B | 3 |
| A mais importante que B | 5 |
| A muito mais importante que B | 7 |
| A extremamente mais importante que B | 9 |
| Valores intermediários utilizados quando se requer maior precisão | 2,4,6 e 8 |

Fonte: (SAATY, 1990a)

O AHP permite que o julgamento humano por vezes incoerente ou inconsistente possa ser tratado e faz uso de um método para medir essas disparidades. Saaty definiu essa consistência como:

$$IC = |\lambda_{\max} - N|/N-1 \quad (1)$$

Onde IC é o índice de consistência, N é a ordem da matriz e λ_{\max} é o maior 'autovetor da matriz de julgamentos. Saaty propõe ainda a utilização de uma razão de consistência RC, dada pela equação (2).

$$RC = IC/IA \quad (3)$$

Onde RC é a razão de consistência, IC é obtido da equação (4) e IA é o índice de aleatoriedade em função da ordem da matriz, que foi proposto para prover aleatoriedade ao método da análise hierárquica e oriundo da Tabela 3.

A razão de consistência (RC) é um dos aspectos importantes do AHP, pois permite avaliar a coerência do conjunto de todos os pares de julgamentos comparativos (TUMMALA e LING, 1998).

Tabela 3 - Índice de aleatoriedade

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| IA | 0,00 | 0,00 | 0,52 | 0,89 | 1,11 | 1,25 | 1,35 | 1,40 | 1,45 |

Fonte: (SAATY, 2009).

Se o valor de RC, encontrado na equação (5) for $\leq 0,1$ a matriz de decisões é consistente e tem validade para o AHP. Saaty (2005) também propõe que o autovetor principal seja o vetor de prioridades justificando a abordagem de autovalores para matrizes com leve inconsistência, onde pequenas variações numa matriz consistente implicam em pequenas variações do autovetor e autovalor..

Muitos autores têm citado a falta de clareza do processo de autovalor (CHU *et al.*, 1979; JOHNSON *et al.*, 1979). Para clarificar o método de autovalor, Lusti (2002) propõe o método numérico de potenciação para calcular o autovetor máximo. O método consiste em um processo iterativo onde:

- A matriz de pares é elevada ao quadrado;
- As linhas são somadas e normalizadas, obtendo-se a primeira aproximação do autovetor;
- Usando-se a matriz resultante repete-se os passos (a) e (b).
- O passo (c) é repetido até que não haja diferença à partir da quarta casa decimal.

A RC é um dos aspectos muito importantes do AHP. Ela permite avaliar a coerência do conjunto de todos os pares de julgamentos comparativos (TUMMALA e LING, 1998).

O AHP vem sendo utilizado na solução de problemas na área de engenharia, podendo ser citados alguns trabalhos que dele fizeram uso.

- Seleção de residência pelo método da análise hierárquica (MAEDA *et al.*, 2011).
- Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis (REZA *et al.*, 2011).
- Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de

britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento (MATTANA *et al.*, 2012).

- d) Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G (BITARAFAN *et al.*, 2012).
- e) Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica (PEREIRA *et al.*, 2012).
- f) Bidding strategy to support decision-making by integrating fuzzy AHP and regression-based simulation (CHOU *et al.*, 2013).
- g) Aplicação De Análise Hierárquica Como Ferramenta De Tomada De Decisão Para Escolha Do Compósito De Reforço Com Polímeros Reforçados Com Fibras (PERELLES *et al.*, 2013)

2.9. ELEMENTOS DE UMA HIERARQUIA NO AHP

Os principais elementos que compõe uma hierarquia para o tratamento de problemas de decisão são os seguintes:

Foco principal: É o objetivo global. Por exemplo: aquisição de um automóvel, escolha de uma residência, seleção de uma universidade ou determinação do melhor investimento.

Conjunto de alternativas viáveis: A possibilidade de decisão ou escolha é o ponto de partida para o AHP, ou para todas as demais metodologias de tratamento do processo.

Conjunto de critérios: É o conjunto de propriedades, atributos, quesitos ou pontos de vista à luz do qual deve ser avaliado para o desempenho das alternativas, sendo esse conjunto:

- Completo: de modo que as propriedades relevantes à solução do problema sejam abordadas;
- Mínimo: não devem acontecer redundâncias ou superposições;
- Operacional: permitindo desse modo a compreensão dos avaliadores e do tomador de decisão (CHANKONG e HAIMES, 1983)

2.9.1. Estruturação da hierarquia

O desenho da hierarquia é o objeto dessa etapa que busca mostrar

graficamente como os elementos que a integram são relacionados.

O processo de decisão é subjetivo. Devido a esse fato, os dados reais que podem ser utilizados no processo de tomada de decisão, características físicas ou mecânicas dos materiais e custos, fazem do AHP um método científico (PERELLES *et al.*, 2013).

O AHP utiliza, durante o processo de decisão, duas fases bem características: a de construção dos níveis e hierarquias e aquela que trata da avaliação. Uma estrutura hierárquica com forma de árvore invertida que vai descendo do foco do problema para os critérios, subcritérios e alternativas em níveis sucessivos (SAATY, 1990b; 1991). A Figura 2 ilustra essa imagem.

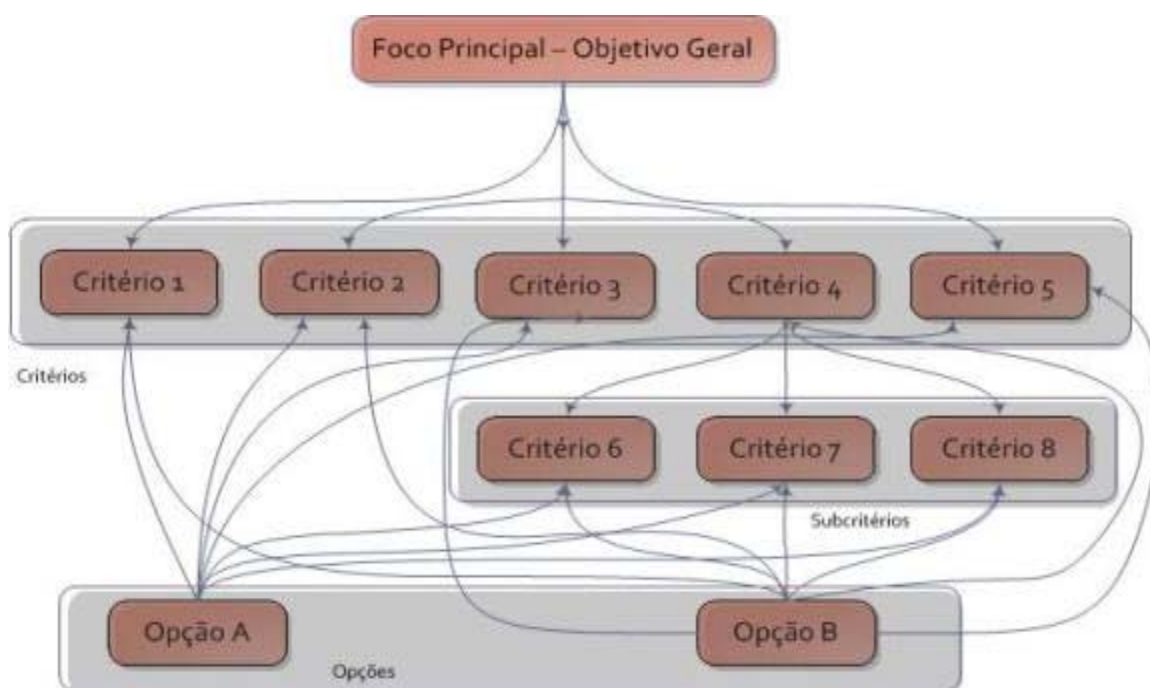


Figura 2 - Modelo de construção hierárquica
Fonte: (MAEDA *et al.*, 2011).

2.10. ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS UTILIZADAS

2.10.1. Lã de rocha

A lã de rocha é produzida a partir de lã mineral. Depois de aquecer as rochas basálticas e outros minerais a cerca de 1500° , estas são transformados em filamentos que, aglomerados com soluções de resinas orgânicas, permitem a fabricação de produtos leves e flexíveis ou até muito rígidos, dependendo do grau de compactação.

A lã de rocha provém de fibras minerais de rochas vulcânicas, entre elas o basalto e o calcário. Esta fibra procedente de depósitos vulcânicos, era já utilizada

pelos nativos das ilhas havaianas na cobertura de suas moradias para protegê-los do frio e do calor. Fibras naturais de rocha vulcânica, apresentado em forma de placa ou manta. Totalmente imune à ação do fogo e com excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico (ROCKFIBRAS, 2014).

2.10.2. Lã de vidro

A lã de vidro provém de uma substância líquida inorgânica obtida através de um composto básico de vários elementos: a sílica, em forma de areia, que assume o papel de vitrificante, o carbonato de sódio, sulfato de sódio e potássio, para que a temperatura de fusão seja mais baixa, e o carbonato de cálcio e magnésio, como estabilizantes para conferirem a este material uma elevada resistência à umidade (TIMPEX, 2013).

2.10.3. Poliestireno expandido

Também conhecido com o nome de “EPS”, é uma espuma termoplástica, cuja estrutura é constituída de esferas cheias de ar produzidas através de vapor de água. O poliestireno expandido é um material celular e rígido, que pode apresentar-se numa variedade de formas e aplicações. Tem como principal vantagem a sua baixa condutividade térmica. A estrutura de células fechadas, cheias de ar, dificulta a passagem do calor o que confere ao EPS um grande poder isolante (PACKAGING, 1999).

2.10.4. Poliestireno extrudado

O poliestireno extrudado, também, denominado XPS. É um produto sintético originário do petróleo e derivado da natureza, tal como o vidro, a cerâmica e os metais. A matéria-prima deste material é o poliestireno, um polímero de estireno, que é extrudado e passa de um estado sólido a um estado fundido, que após o arrefecimento retorna ao estado sólido (DIVERSIFOAM PRODUCTS).

2.10.5. Poliuretano

A espuma de poliuretano é um material isolante formado por dois componentes: Polioli e Isocionato. Estas espumas são úteis no fechamento de pequenas aberturas, mas a sua grande capacidade isolante térmica e o fato de ser

altamente moldável e expansiva torna-a ideal no isolamento de superfícies irregulares e com reentrâncias. Funciona como barreira ao ar, mas não ao vapor e deve ser protegida de exposições prolongadas à luz solar. Quando utilizada no interior de edifícios, deverá ser revestida por um material incombustível (THE ESSENTIAL CHEMICAL INDUSTRY, 2013).

2.11. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS UTILIZADAS

Neste item são apresentados os procedimentos empregados no AHP para que sejam feitas as associações das prioridades às alternativas, tendo sido consideradas para o estudo, os isolantes térmicos, Lã de rocha, Lã de vidro, EPS - Poliestireno expandido, XPS - Poliestireno extrudado e PU – Poliuretano.

Para os critérios foram considerados HMIS – *Hazardous Material Identification System*, cuja tradução livre é SIMP – Sistema de Identificação de Materiais Perigosos (FARLEX, 2002), massa específica, temperatura máxima, coeficiente de transmissão térmica, EI e custo.

2.11.1. HMIS

O HMIS é uma classificação de risco numérico que incorpora o uso de etiquetas com barras codificadas por cores, bem como materiais de treinamento. Ele foi desenvolvido pela NPCA - *National American Coating Association*, que pode ser traduzido livremente como Associação Nacional Americana de Revestimentos, como um auxílio para o cumprimento da OSHA - *Occupational Safety and Health Administration* Hazard Communication Standard, que pode ser traduzida livremente como Administração de Segurança e Saúde Ocupacional, Norma de Comunicação de Perigo. Sendo “**quanto menor melhor**”.

O HMIS é composto de quatro elementos:

- *Health* - Saúde
- *Flamability* – Inflamabilidade;
- *Physical hazard* – Risco físico;
- *PPE* - EPI – Equipamento de proteção Individual.

O Anexo I ilustra a barra de cores.

A barra de cores HMIS é semelhante ao diamante de risco, criado pela NFPA - *National Fire Protection Association*. Antes de 2002, o diamante de risco e barra de

cores tinham seções de cor azul, vermelho, branco e amarelo. Depois de abril de 2002, com o lançamento do HMIS III, o amarelo na barra de cores, que ficou para reatividade, foi substituído pelo laranja, representando perigo físico. O diamante de risco é projetado para situações de emergência, quando a informação sobre exposição aos efeitos de curto prazo, ou aguda, é necessária. A barra de cores não é usada para emergências mas para transmitir informações mais amplas de alertas de saúde.

As quatro barras são codificadas utilizando os símbolos da moderna barra de cores, com o azul indicando o nível de perigo para a saúde, vermelho para inflamabilidade, laranja para um perigo físico e branco para proteção pessoal ou EPI.

2.11.1.1. *Health* - Saúde – cor azul;

A seção Saúde transmite os perigos para a saúde ocasionados pelo material. São utilizados valores numéricos (0 = baixo risco para 4 = alto risco). Na versão mais recente do HMIS, a barra de Saúde azul tem dois espaços, um para um asterisco e um para a classificação de risco numérico. Se estiver presente, o asterisco significa um perigo crônico para a saúde, o que significa que a exposição a longo prazo para o material pode provocar um problema de saúde, tal como enfisema ou dano renal. De acordo com NPCA, o procedimento de avaliação de risco numérico difere daquele utilizado pela NFPA. Os números a seguir indicam o grau de periculosidade:

2.11.1.2. *Inflamability* - Inflamabilidade - cor vermelho;

Para HMIS I e II, os critérios usados para atribuir valores numéricos (0 = baixo risco para 4 = alto risco) são idênticos aos utilizados pela NFPA. Em outras palavras, nesta categoria, os sistemas são idênticos. Para HMIS III, os critérios de inflamabilidade são definidos de acordo com as normas da OSHA.

2.11.1.3. *Physical Hazard* - Riscos físicos – cor laranja

Os riscos de reatividade são avaliados utilizando o critério OSHA de perigo físico. Sete dessas classes de risco são reconhecidas: reativos de água, peróxidos orgânicos, explosivos, gases comprimidos, materiais pirofóricos, oxidantes, reativos instáveis. São utilizados critérios para atribuir valores numéricos que variam do (0 = baixo risco a 4 = alto risco).

2.11.1.4. *PPE* - EPI – cor branco;

Este é o aspecto mais relevante na diferença entre os sistemas de HMIS e NFPA. No sistema NFPA, a área branca é usada para transmitir riscos especiais enquanto HMIS usa a parte branca para indicar o equipamento de proteção individual (EPI) devem ser utilizados ao trabalhar com o material. São utilizados critérios para atribuir valores alfabéticos que variam do (A = baixo risco a K = alto risco).

O anexo II ilustra os índices.

2.11.2. Densidade ou massa específica

A transferência de calor através de material de isolamento ocorre por meio de condução, enquanto que a perda de calor ou ganho de calor da atmosfera ocorre por meio de convecção e radiação. Em geral, quanto maior for a densidade de um material, maior será a condutividade térmica, por exemplo, metais tem uma elevada densidade e uma elevada condutividade térmica.

Esta característica se enquadra no aspecto de que “**quanto menor melhor**”.

2.11.3. Temperatura máxima

Esta característica considera a temperatura máxima de serviço que é uma medida que indica a temperatura máxima contínua na qual um material de isolamento pode operar sem qualquer perda de desempenho de isolamento térmico, sendo medida em °C. Sendo “**quanto maior melhor**”.

2.11.4. Coeficiente de condutividade térmica

O coeficiente de transmissão térmica é uma medida da capacidade de um material de transferência de calor por unidade de tempo, dada uma unidade de superfície do material e um gradiente de temperatura através da espessura do material. Ele é medido em W/m°C. Sendo “**quanto menor melhor**”.

2.11.5. Energia incorporada

Os valores dessa característica foram obtidos do trabalho de Mendonça (2005) que considerou para os cálculos cerca de 94% de recursos não renováveis e 6% de recursos renováveis, sendo portanto, “**quanto menor melhor**”. A

unidade utilizada na pesquisa para essa característica é o MJ.

2.11.6. Custo

Os materiais isolantes utilizados foram selecionados de modo a que a espessura de cada um deles fosse 50mm ou com valores comerciais próximos. Os valores dessa característica foram obtidos através de pesquisa no mercado brasileiro.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo encontra-se a descrição da metodologia para obtenção do tempo de retorno energético de isolantes térmicos de edificações na zona bioclimática 1 do Brasil. A metodologia foi dividida em seis etapas para determinação *payback*.

Foi utilizado o método de estudo de caso que é uma investigação empírica que averigua um fenômeno contemporâneo no seu contexto de vida real, mesmo que os limites entre o fenômeno estudado e o contexto não estejam claramente definidos (YIN, 2005).

Foi utilizado o AHP para seleção do isolante térmico de melhor desempenho, tendo sido consideradas seis características para os cinco isolantes térmicos elencados no estudo. O Processo de Análise Hierárquica (AHP) fornece uma maneira conveniente de quantificar os aspectos qualitativos, eliminando assim a subjetividade no resultado (TIWARI, 2009).

Foi discutida a matriz energética nos EUA e no Brasil relacionando-se as de fonte renovável com as de fonte não renovável.

A EI da lã de rocha foi calculada para os EUA e o Brasil. O cálculo da EI foi demonstrado em uma planilha a partir da informação dos quantitativos de materiais utilizados para a produção do isolante ao longo do ciclo de vida e respectivos transportes, nos dois países.

Para a aplicação do método foram definidos quatro modelos (A), (B), (C) e (D). Foi demonstrada a EI para construção dos modelos utilizados na pesquisa, tendo sido considerados os fatores de EI nos materiais de construção, o custo energético dos transportes, ao longo do ciclo de vida e respectivos transportes.

A EO foi calculada com base na equação de energia, tendo sido utilizados os resultados do trabalho de Graf (2011) para a montagem de um sistema de duas equações visando a obtenção de duas variáveis necessárias à utilização na equação. Foi feita a comparação entre a EI necessária à construção do modelo R1-N e a aplicação do isolamento no envelope com a EO necessária à manutenção da variação de temperatura encontrada no sistema de equações.

O tempo de *payback* foi calculado com base na EI de cada um dos modelos utilizados e na EO desses modelos.

3.1. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

O AHP tem uma configuração subdividida em objetivo, critérios e variáveis, além de alternativas. Foram realizadas, com base nesse modelo, as análises tanto dos critérios (HMIS, massa específica, temperatura máxima, coeficiente de condutividade térmica, EI e custos), bem como das alternativas (lã de rocha, lã de vidro, poliestireno expandido, poliestireno extrudado e poliuretano) na busca do isolante térmico de melhor desempenho. O modelo utilizado neste trabalho encontra-se ilustrado na Figura 3.

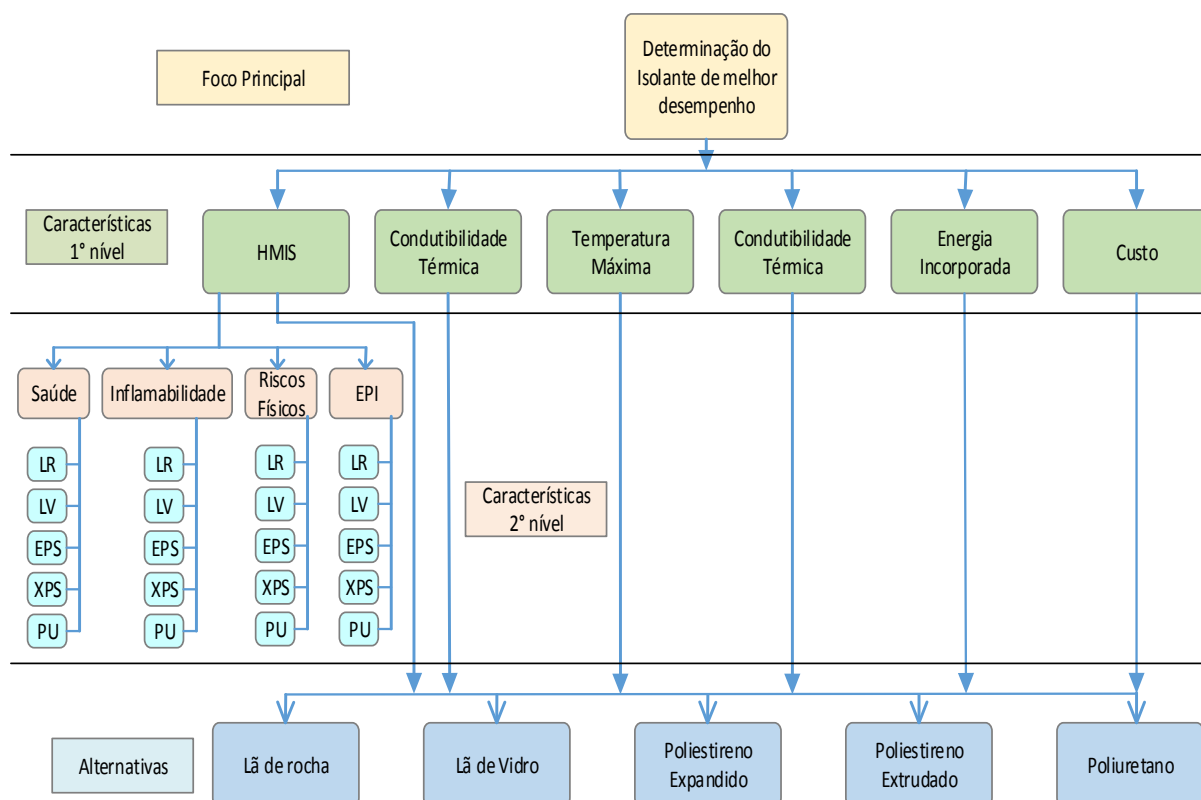


Figura 3 – Modelo do AHP utilizado na dissertação

Fonte: O autor

3.2. MODELAGEM DO PROBLEMA

Conforme ilustrado na Figura 3, a característica HMIS por ser uma característica de segundo nível, é necessário concluir esse nível para incluir os resultados na tabela com as características dos materiais isolantes.

A Tabela 4 ilustra as características dos materiais isolantes utilizadas no trabalho.

Tabela 4 – Características dos materiais isolantes

| Materiais Isolantes | HMIS | Massa Específic. Kg/m³ | Temp. Máxima °C | Condutiv. Térmica W/m²°C | Energia Incorpor. MJ | Custo R\$ |
|------------------------------|-------------|--|----------------------------|--|---------------------------------|----------------------|
| Lã de Rocha | 0,1136 | 37,5 | 750,00 | 1,4000 | 22,00 | 15,88 |
| Lã de Vidro | 0,1907 | 46,0 | 500,00 | 2,3000 | 41,00 | 23,87 |
| Poliestireno Expandido (EPS) | 0,1819 | 25,0 | 70,00 | 1,3000 | 140,00 | 19,99 |
| Poliestireno Extrudado (XPS) | 0,1733 | 33,0 | 85,00 | 1,6000 | 163,00 | 56,00 |
| Poliuretano (PU) | 0,3405 | 32,0 | 112,00 | 1,8000 | 123,00 | 46,44 |

OBS.: (Massa específica da lã de rocha (ROCKFIBRAS, 2014); Custo da lã de rocha e de vidro, EPS e PU (LEONARDI, 2014); XPS (SILVA, 2014).

Fonte: (MENDONÇA, P. J. F. A. U., 2005)- Valores Médios

3.2.1. HMIS

Nos dados da Tabela 5 para os índices Saúde, Inflamabilidade e Risco Físico, que variam de 0 a 4, foi acrescentada uma unidade, passando para a variação de 1 a 5.

Tabela 5 – Índices HMIS dos materiais pesquisados

| Material | Health (Saúde) | Flamability (Inflamabilidade) | Physical Hazard Risco | PPE (EPI) |
|------------------------------|---------------------------|--|--------------------------------------|----------------------|
| Lã de Rocha | 1 | 1 | 1 | 1,8182 |
| Lã de Vidro | 2 | 1 | 1 | 4,5455 |
| Poliestireno Expandido (EPS) | 2 | 3 | 1 | 1,8182 |
| Poliestireno Extrudado (XPS) | 2 | 1 | 1 | 1,8182 |
| Poliuretano (PU) | 3 | 5 | 2 | 10 |

Fonte: o autor com base na Tabela 5

No caso do índice EPI que varia de A a K foi feita a equivalência utilizando-se uma regra de três simples que resultaram nos valores, constantes da Tabela 6.

Tabela 6 - Regra de três do índice EPI

| Regra de três do índice EPI | | |
|------------------------------------|----|---------|
| A | 1 | 0,90909 |
| B | 2 | 1,81818 |
| C | 3 | 2,72727 |
| D | 4 | 3,63636 |
| E | 5 | 4,54545 |
| F | 6 | 5,45455 |
| G | 7 | 6,36364 |
| H | 8 | 7,27273 |
| I | 9 | 8,18182 |
| J | 10 | 9,09091 |
| K | 11 | 10,0000 |

Fonte: O autor

O próximo passo é o da determinação das prioridades. Este ajuste é fundamentado na capacidade do homem de perceber que existe relacionamento entre objetos e situações observadas, comparando pares, baseados em um determinado foco ou critério, também denominado de julgamentos paritários.

O objetivo principal é determinar o isolante térmico de melhor desempenho, com bases no custo e nas características físicas. A determinação da importância de cada critério foi feita com base nos dados constantes da Tabela 7. Os pesos foram atribuídos em função de sua importância no processo. Desse modo o custo teve peso 9, a energia incorporada 8, a condutividade 6, a massa específica 3, o HMIS 2 e a temperatura 1. A relação de consistência de 9,5% dá confiabilidade ao modelo. A Tabela 7 ilustra esses pesos.

Tabela 7 – Pesos atribuídos aos riscos

| | Saúde (Health) | Inflamabilidade (Flamability) | Risco Físico (Physical Risk) | EPI (PPE) | Importância Relativa |
|-------------------------------|-------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------------|
| Saúde (Health) | 1 | 9 | 5 | 3 | 0,59738 |
| Inflamabilidade (Flamability) | 1/9 | 1 | 1/5 | 1/3 | 0,04741 |
| Risco Físico (Physical Risk) | 1/5 | 5 | 1 | 3 | 0,22722 |
| EPI (PPE) | 1/3 | 3 | 1/3 | 1 | 0,12799 |
| Total Geral (TG) | | | | | 1,00000 |
| IC= | | 0,0863 | RC= 0,0958 | | |

Fonte: O autor

3.3. ISOLANTES TÉRMICOS

Tendo em vista que na metodologia, através da utilização do AHP a lã de rocha foi selecionada como o material mais adequado, o foco do trabalho e cálculo da EI, dar-se-á sobre este isolante.

3.4. MATRIZ ENERGÉTICA

Por muitos anos, os combustíveis fósseis - incluindo carvão, petróleo bruto e gás natural - têm sido a principal fonte de energia para uso comercial, industrial, aquecimento e transporte. Os hidrocarbonetos, e especialmente os de petróleo, também têm sido utilizados na indústria farmacêutica, construção e indústrias de vestuário, bem como para fertilizantes, produtos alimentícios, indústria de plásticos e tintas. A inclusão de outras fontes de energia, como a nuclear e energias renováveis,

como a eólica, solar, geotérmica, água e biomassa, na matriz energética tem sido marginal, por causa de altos custos e tecnologias subdesenvolvidas. No caso da energia nuclear, há preocupações de segurança adicionais, incluindo a eliminação de longo prazo de resíduos radioativos. O grande desafio colocado por essas projeções é que o setor de energia é responsável por 60 por cento das emissões de gases de efeito estufa globais e é, portanto, um fator importante no aquecimento mundial. Ao mesmo tempo, a energia barata e confiável é essencial para o desenvolvimento econômico sustentado, o crescimento, melhoria dos padrões de vida e mitigação da pobreza no mundo em desenvolvimento. De fato, uma parte significativa dos novos investimentos no setor de energia nas próximas décadas terá lugar no mundo em desenvolvimento. Consequentemente, a energia é a questão fundamental na interface dos desafios climáticos e de desenvolvimento (UNCTAD, 2010).

3.4.1. Matriz energética ns Estados Unidos

Os EUA - Estados Unidos da América são o segundo maior consumidor de energia em termos de consumo total em 2010 (BARR, 2012).

A maior parte desta energia é derivada de combustíveis fósseis. Em 2010, os dados mostraram que 25% da energia do país vieram de petróleo, 22% do carvão e 22% a partir do gás natural. A energia nuclear fornece 8,49% e energia renovável fornecem 9,52%⁷, que tem origem principalmente nas usinas hidrelétricas, embora outras fontes renováveis estejam incluídas. A energia eólica fornece 1,22%, a geotérmica 0,23% e a solar 0,16% (EIA, 2012).

O consumo de energia tem aumentado num ritmo mais rápido do que a produção de energia ao longo dos últimos 50 anos nos EUA. Sendo atualmente essa diferença suprida através de importações (RISTINEN e KRAUSHAAR, 2006).

De acordo com estatísticas da Administração de Informação de Energia, o consumo per capita de energia nos EUA tem sido um pouco consistente a partir de 1970 até a atualidade. A média foi 334 milhões de unidades térmicas britânicas (BTU) por pessoa 1980-2010. Uma explicação sugerida para isso é que a energia necessária para produzir o aumento do consumo de equipamentos fabricados, carros e outros

⁷O consumo total de energia relatado acima do relatório anual de energia foi ajustado por um fator de equivalência de combustíveis fósseis, a fim de estimar o quanto de óleo seria necessário para fornecer toda a energia utilizada. Embora haja 3.412 BTU por kWh, um fator de 10.460 BTU/kWh foi usado para nuclear e 9.760 BTU / kWh para a energia renovável, em 2010, para refletir o quanto de óleo seria necessário. Isso aumenta o consumo total de energia relatado, e mais ou menos triplica a participação aparente de fontes de combustíveis não fósseis. Como o óleo é menos importante, pode ser removido desta adaptação, é em grande parte o caso em outros países (U.S., 2011).

bens dos EUA foi deslocada para outros países produtores e transporte desses bens para aquele país com uma mudança correspondente de gases de efeito estufa e poluição. Em comparação, a média mundial aumentou de 63,7 milhões de BTU em 1980 para 72,4 milhões de BTU, por pessoa, em 2008. Por outro lado, a produção americana fora dos EUA é por vezes exagerada, tendo a produção interna dos EUA crescido 50% desde 1980 (THE DIRT, 2011).

A maior parte da energia elétrica nos Estados Unidos é produzida usando turbinas a vapor. Essas turbinas são movidas a combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo, e gás natural. O combustível é queimado em um forno para aquecer a água em uma caldeira para produzir vapor. Em 2012, o carvão foi usado por cerca de 37% dos 4 trilhões kWh de eletricidade gerada. Das fontes de geração de eletricidade dos EUA em 2012, 12% são renováveis, Petróleo 1%, nuclear 19%, o gás natural 30% e carvão 37%.

A energia hidrelétrica, representou cerca de 7 % da produção de eletricidade nos EUA em 2012. A biomassa é material derivado de plantas ou animais (ou seja, biogênicos) e inclui resíduos de madeira, restos de comida, grama, folhas, papel em resíduos sólidos urbanos (lixo) e da silvicultura além de resíduos agrícolas, como aparas de madeira, milho, espigas e palha de trigo, representando cerca de 1% da energia elétrica gerada nos Estados Unidos em 2012. A energia eólica é produzida através da conversão de energia eólica em eletricidade. Essa geração aumentou significativamente nos Estados Unidos desde 1970, mas continua a ser uma pequena fração da geração de eletricidade dos EUA, cerca de 3% em 2012. A energia geotérmica provém de energia térmica oriunda do interior da terra. Em algumas áreas dos Estados Unidos, bastante calor sobe perto da superfície da terra para aquecer a água subterrânea em vapor, que pode ser aproveitado para uso em usinas de turbina a vapor, gerando cerca de 1 % da energia elétrica nos Estados Unidos em 2012. A energia solar é derivada da energia do sol. Existem dois tipos principais de tecnologias para a conversão de energia solar em eletricidade: fotovoltaicos (PV) e elétricos a energia solar térmica. Em 2012, menos de 1% da geração de eletricidade dos EUA foi a partir da energia solar (EIA, 2013).

A Figura 4 ilustra os dados de 2011, demonstrando que houve um acréscimo de fontes de energia renovável em 2011 de 9% (EIA, 2012) para 12% em 2012 (EIA, 2013).

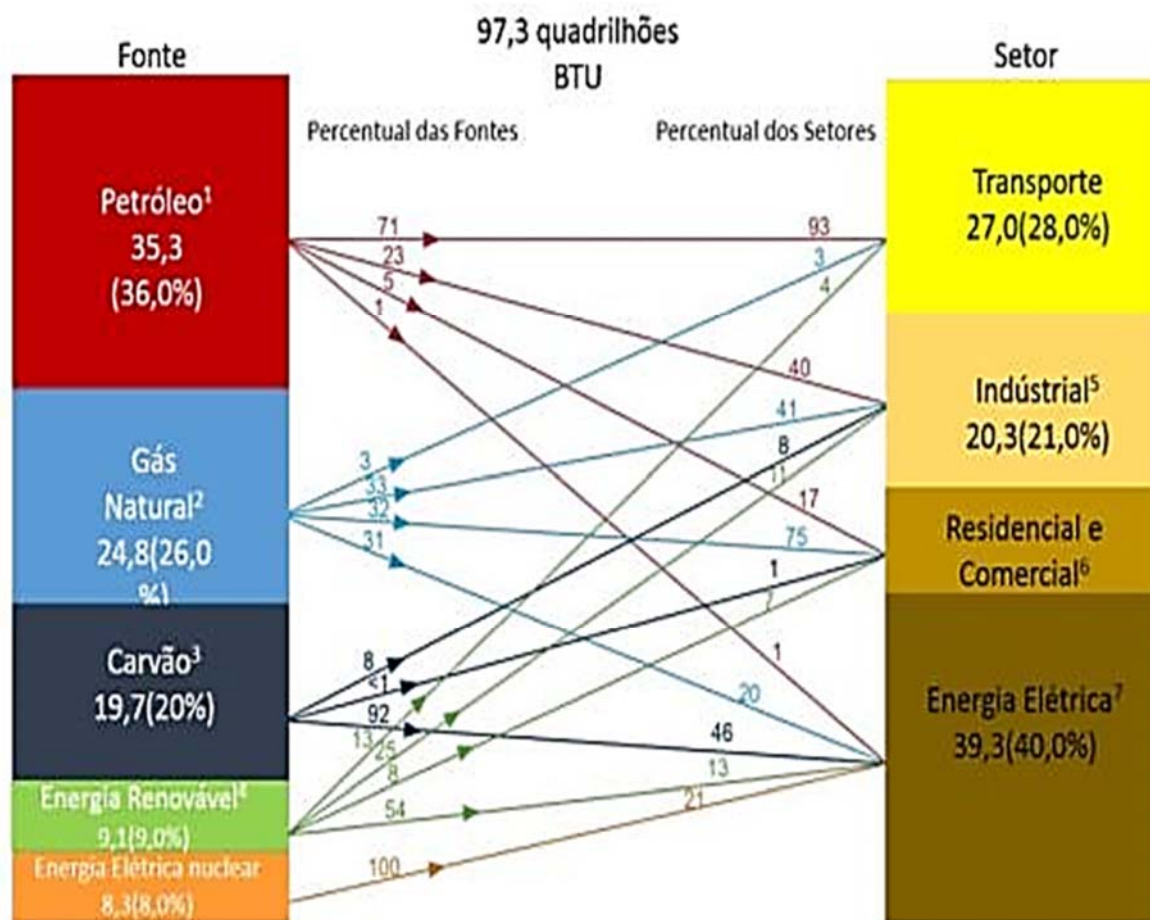


Figura 4 – Consumo primário de energia por fonte e setor⁸.
Fonte: (EIA, 2012)

A matriz americana apresenta 9,52% de sua energia com origem em fontes renováveis e 90,48% com origem em fontes não renováveis.

A Figura 5 ilustra esses percentuais.

⁸ ¹Não inclui os biocombustíveis que foram misturados com petróleo - biocombustíveis estão incluídos na "Energia Renovável". ²Exclui os combustíveis gasosos suplementares. ³Inclui a menos de 0,1 quadrilhões de BTU de importações líquidas de coque de carvão. ⁴De energia convencional hidrelétrica, geotérmica, solar, fotovoltaica, eólica e biomassa. ⁵Inclui produção de energia combinada de calor/potência e indústrias alimentadas apenas por hidrelétricas. ⁶Inclui produção de energia combinada de calor/potência e comércio alimentados apenas por hidrelétricas. ⁷Elettricidade somente de produção combinada de calor e potência cuja atividade principal é vender eletricidade, ou de eletricidade e calor, para o público. Inclui 0,1 quadrilhões de BTU de rede de energia elétrica importações não mostrado em "Fonte".

Notas: energia primária na forma em que é contabilizado pela primeira vez para um balanço de energia em estatística, antes de qualquer transformação para formas secundárias ou terciárias de energia (por exemplo, o carvão é utilizado para gerar eletricidade). Soma de componentes pode não ser igual total devido a arredondamentos independente.

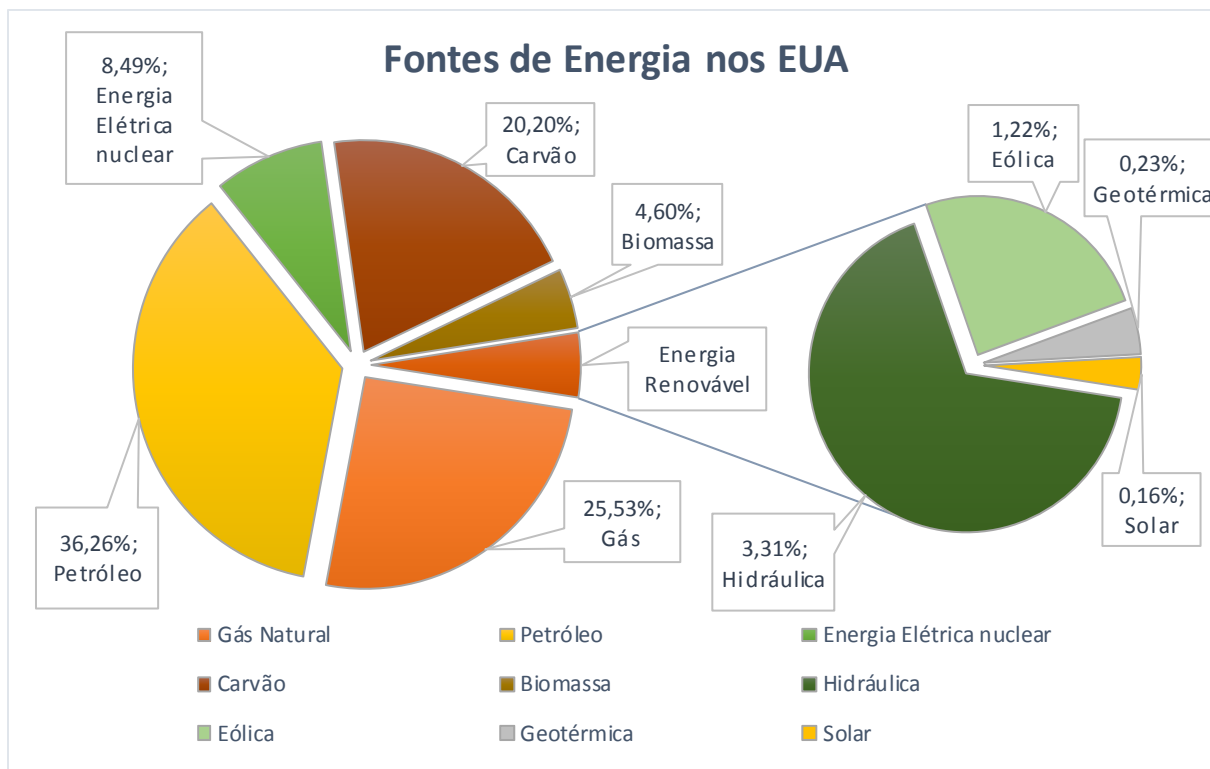


Figura 5 – Fontes de energia nos EUA
Fonte: (EIA, 2013)

3.4.2. Matriz energética no Brasil

O Brasil apresenta uma matriz predominantemente renovável através da utilização de energia elétrica hidráulica. As contas nacionais de geração hidráulica reportam cerca de 70,1% da oferta. Adicionando as importações, que também são principalmente a partir de fontes renováveis, verifica-se que 84,50% da eletricidade no Brasil vem de fontes renováveis e 15,50% de fontes não renováveis. Do lado do consumo, o setor residencial teve um incremento 2,1%. O setor industrial registrou um ligeiro aumento de 0,3% no consumo de energia elétrica em relação ao ano anterior. Os demais setores, público, agricultura e pecuária, comerciais e de transporte, após análise mostraram coletivamente um crescimento positivo de 6,9% em relação ao ano anterior. O setor de energia aumentou 12,7%. Em 2012, devido a um aumento de aproximadamente 3,8GW, a capacidade instalada no Brasil chegou a 120,97W que é a soma dos serviços públicos e autoprodutoras. Desse total, o aumento em usinas hidrelétricas foi responsável por 47,8%, enquanto as usinas termelétricas responderam por 40,0 % do incremento de capacidade (BRASIL, 2013).

A Figura 6 ilustra a produção de energia primária - anos de 1970 e 2012.

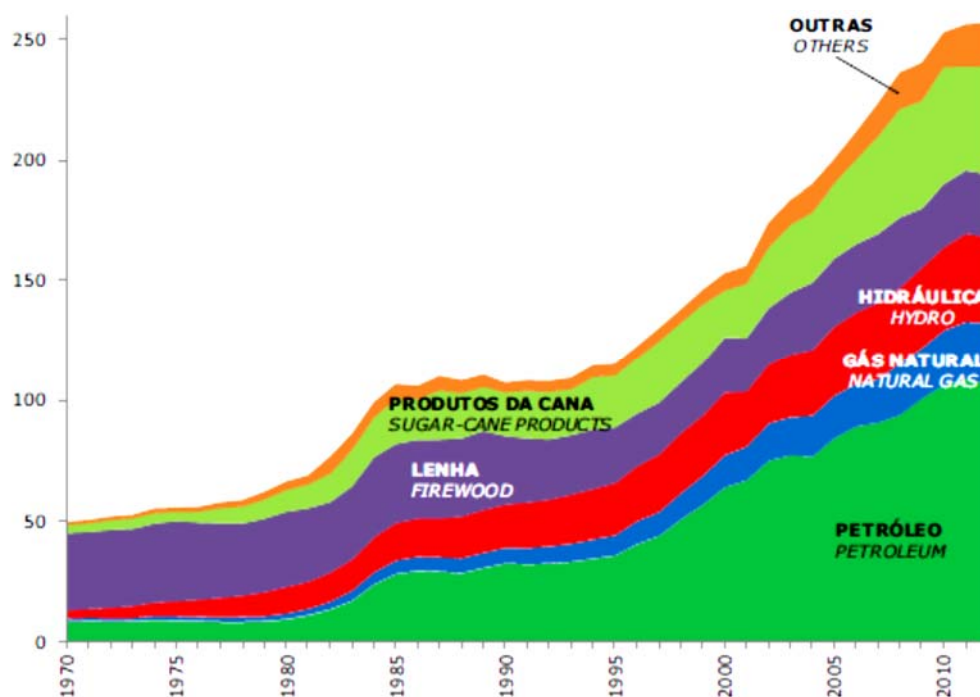


Figura 6 – Produção de energia primária
Fone: (BRASIL, 2013)

A Figura 7 ilustra o consumo final por fonte de energia - anos de 1970 e 2012.

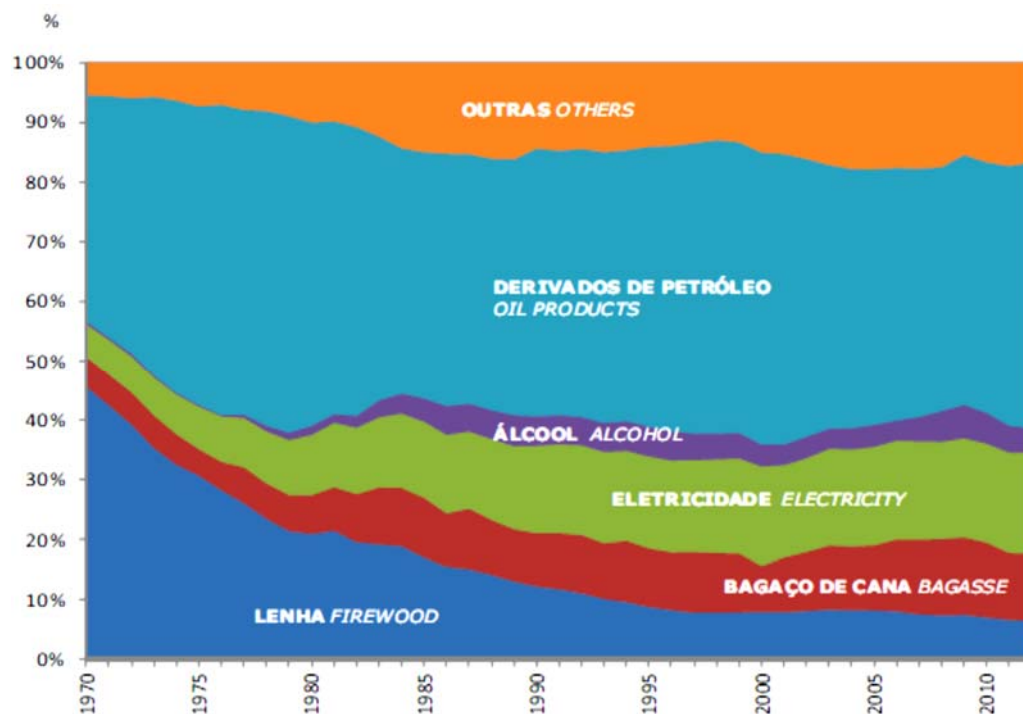


Figura 7 – Consumo final por fonte
Fonte: (BRASIL, 2013)

A Figura 8 ilustra a oferta interna de energia elétrica por fonte para o ano de 2012.

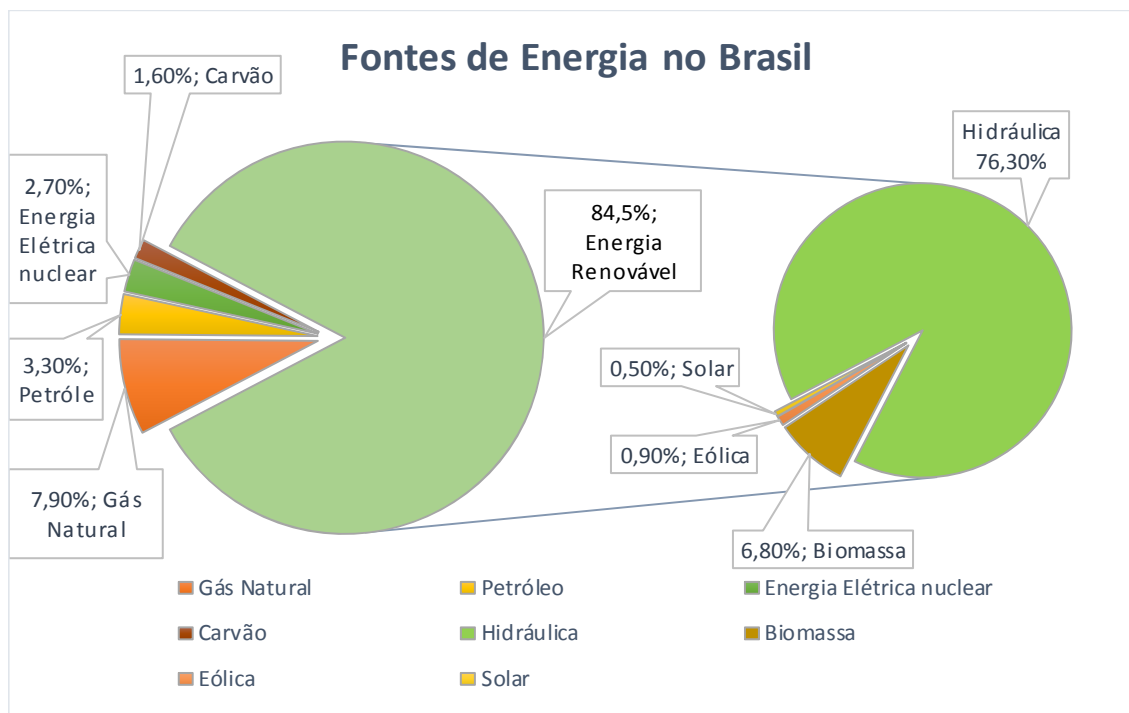


Figura 8– Fontes de energia no Brasil
Fonte: (BRASIL, 2013)

3.4.3. Comparativo da matriz energética americana com a brasileira

Os dados desta dissertação apontam que a matriz de energia elétrica americana tem cerca de 90,48% de fontes não renováveis e cerca de 9,52% de fontes renováveis. As fontes não renováveis compreendem o petróleo com 36,26%, o gás natural com 25,53%, o carvão com 20,20% e a energia elétrica de fonte nuclear com 8,49%. As fontes renováveis compreendem 4,60% de biomassa, 3,31% de energia hidráulica, 1,22% de energia eólica, 0,23% de energia geotérmica e 0,16% de energia solar e (EIA, 2012).

A matriz energética brasileira indica 84,5% da energia oriunda de fontes renováveis e 15,5% de fontes não renováveis. As fontes de energia não renováveis compreendem o gás natural com 7,90%, o petróleo com 3,30%, a energia elétrica nuclear com 2,70% e o carvão com 1,6%. As fontes renováveis compreendem a energia hidráulica com 76,30%, a biomassa com 6,80%, energia eólica com 0,90% e a solar com 0,50% (BRASIL, 2013)

A Figura 9 ilustra essa comparação.

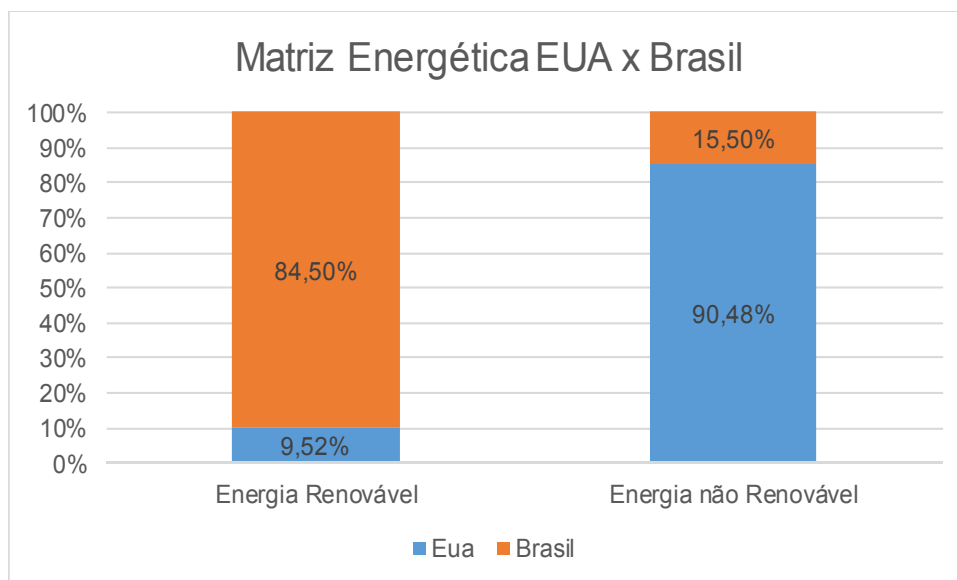


Figura 9 – Matriz energética Brasil x EUA
Fonte: (BRASIL, 2013)

3.5. A ENERGIA INCORPORADA NA LÃ DE ROCHA NOS ESTADOS UNIDOS

O presente tópico foi desenvolvido tendo por base o relatório publicado pela PE Americas (2013). Este relatório foi apresentado em 25 de agosto de 2010, tendo sido preparado pela PE AMERICAS para a NAIMA – *North American Insulation Manufacturers Association*. O objetivo desse relatório é realizar a Avaliação do Ciclo de Vida de sistemas de isolamento representativos do berço ao portão. O trabalho inicial teve como foco a sustentabilidade ambiental da lã de rocha e plataformas de isolamento de lã de escória, mas pode ir além disso para posicionar essas plataformas dentro de um ou mais aplicativos e fase de utilização (tais como edifícios comerciais e industriais, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado e aplicações do sistema de dutos) no futuro.

O relatório elaborado para a NAIMA, citado no parágrafo anterior doravante denominada de relatório NAIMA, avaliou três unidades funcionais: placas de 1m² com três polegadas de espessura de baixa densidade, placas de 1m² com três polegadas de espessura de alta densidade, e 1 kg de enchimento solto granulado. Uma avaliação independente de cada material foi conduzida, e a NAIMA comenta que não deve ser interpretada como uma avaliação comparativa destas três unidades funcionais, quando não se destinam a cumprir a mesma função ou utilização específica.

A pesquisa objeto da presente dissertação teve como foco uma placa de 1m² com duas polegadas de espessura de baixa densidade, por ser aquela comumente

utilizada na construção civil para fins de isolamento térmico. Uma vez que a espessura comercial de lã de rocha no Brasil é a de 50 mm de espessura, os dados americanos foram adaptados para essa realidade, passando a ser denominada apenas placa.

A descoberta principal do relatório NAIMA é que a fase de produção impulsiona os perfis ambientais, com a maioria do impacto ambiental gerado no derretimento e acabamento/processos gerais. Os detalhes sobre estes resultados são os seguintes:

O uso de resíduos (por exemplo, escória) como uma entrada de material primário reduz significativamente o impacto ambiental do quantitativo de matéria prima utilizada no lote que compõe cada carga de material necessário à produção de dado material;

O coque é o principal condutor das emissões de gases de efeito estufa aumentando o PAG - Potencial de Aquecimento Global e chuva ácida, que causam emissões de gases e potencial de acidificação, para todos os produtos estudados;

Os materiais aglutinantes representam uma fonte significativa de emissões de nitrogênio, potencial de eutrofização, na produção das placas;

A fase de acabamento e aquela denominada de operações aéreas, combinadas, são a principal fonte de emissões destruidoras de ozônio, potencial de esgotamento do ozônio, para a produção de placas;

O transporte tem um impacto menor, bem como o fim da vida útil dos resíduos de produção, nele considerados o transporte desse material para fora da indústria, seja para reaproveitamento como matéria prima, seja para deposição em aterros.

Os impactos ambientais do produto foram estudados utilizando a metodologia TRACI – *Toll for reduction and assesstment and other environmental impacts*, que pode ser traduzido como: Ferramenta para a redução e avaliação e outros impactos ambientais. O resultado da pesquisa foi publicado pela US EPA – *United States Environmental Protection Agency*, que pode ser traduzido como agência americana de proteção do meio ambiente. As categorias de impacto estudadas incluem a demanda primária de energia renováveis não renováveis, potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, o potencial de destruição do ozônio, e potencial de criação de poluição. Os resultados do estudo estão resumidos a seguir.

Um resumo das conclusões da pesquisa está na Tabela 8.

Tabela 8 – Demonstrativo dos impactos Ambientais e demanda de energia primária para 1 m² de placa de lã de rocha com 50mm de espessura.

| Impactos Ambientais | Quantidade |
|---|------------|
| Demanda de energia primária não renovável (MJ) | 44,59 |
| Demanda de energia primária renovável (MJ) | 2,99 |
| Aquecimento Global da Atmosfera (kg CO ₂ Equiv.) * | 3,32 |
| Acidificação do Ar (mol H ⁺ Equiv.) | 1,26 |
| Eutrofização (kg N – Equiv.) | 6,00E-04 |
| Redução da camada de ozônio (kg CFC 11 – Equiv.) | 8,13E-08 |
| Poluição do Ar (Inclusive NO _x – Equiv.) (kg NO _x – Equiv.) | 4,48E-06 |

Fonte: (PE AMERICAS, 2010) (adaptado pelo autor)

3.5.1. Unidade funcional e fluxo de referência

A base da função que o produto se propõe a cumprir é a unidade funcional. Ela é colocada de modo a fornecer uma base de referência em relação à qual os dados de entrada e saída arrolados são normalizados num sentido matemático, sendo fundamental que mensurável (ISO, 2006). A unidade funcional faz a qualificação e quantificação da função definida para o sistema em estudo, sendo necessário o conhecimento relativos a aspectos técnicos do produto (ILCD, 2010).

O passo seguinte do processo é a determinação do fluxo de referência que provê para cada cenário as quantidades necessárias de produtos por unidade funcional (THÉRÉZIAN, 2003).

Um fluxo de referência é uma quantidade de produto, incluindo as partes dele, necessária para que um determinado sistema de produto tenha o desempenho descrito pela unidade funcional. Esta pode ter vários fluxos de referência (SILVA, 2012).

3.5.1.1. Unidade funcional

Uma vez que o estudo da EI da lã de rocha abrange a fase do berço ao portão, não incluindo sua utilização a unidade funcional é a produção de 1 m² de placa de lã de rocha com 50 mm de espessura, massa específica de 35,5 kg/m³, temperatura máxima de 750 °C (ROCKFIBRAS, 2014) e condutividade térmica de 1,40 W/m²°C (MENDONÇA, 2005).

3.5.1.2. Fluxo de referência

O fluxo de referência estabelecido foi similar a própria unidade funcional, ou

seja a produção de 1 m² de lã de rocha de 50 mm de espessura.

3.5.2. Visão geral do ciclo de vida

O ciclo de vida da placa inicia-se com a extração da matéria prima indicada na Figura 10 como materiais de lote. Esses materiais são fundidos e combinados com materiais aglomerantes, sendo em seguida conformados para a densidade necessária. Após os períodos de cura e arrefecimento são cortados na forma desejada e empacotados.

Sua aplicação final na construção utiliza um número mínimo de fixação. A fase de utilização é para esses produtos livres de ônus, pois não necessitam de manutenção, além de possuírem um tempo de serviço de referência igual ao de toda a construção. Quando o edifício é demolido, assume-se que o isolamento deva ser enviado para o aterro sanitário.

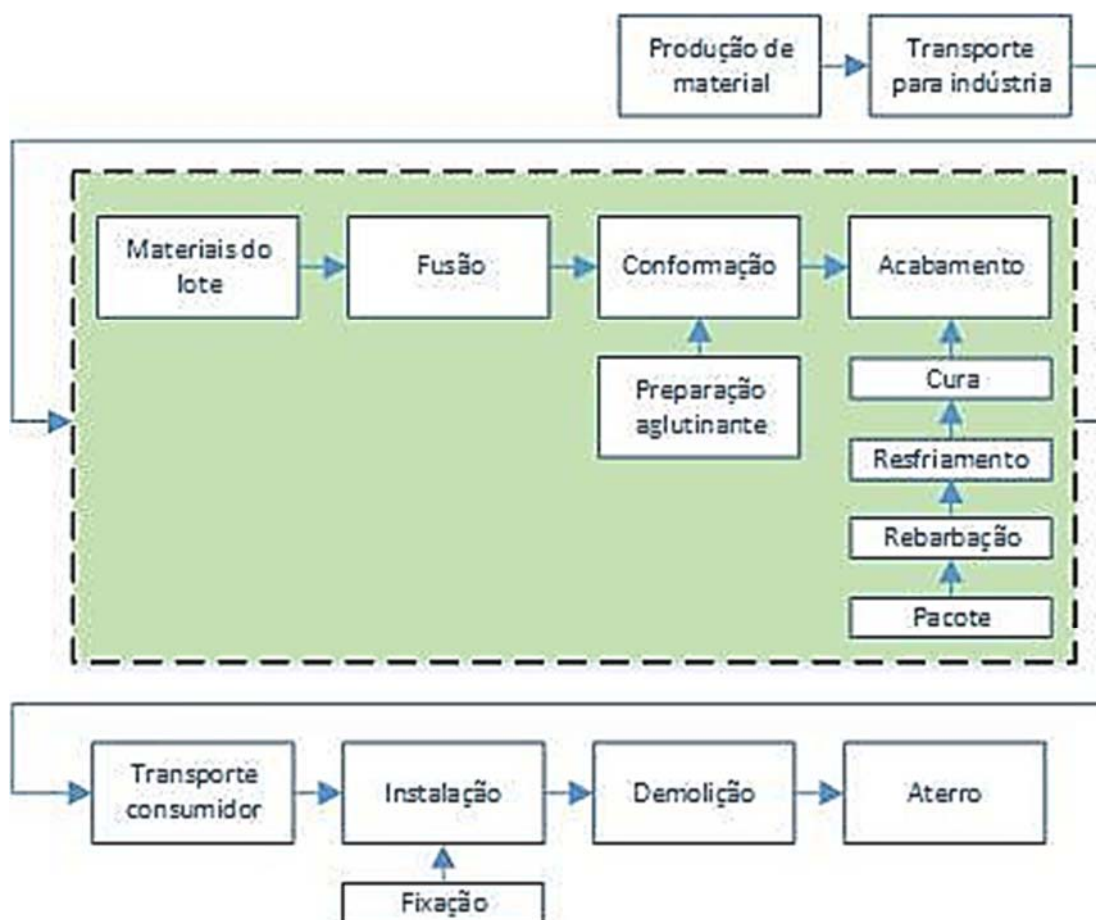


Figura 10 – Ciclo de vida do berço ao túmulo da placa de lã de rocha
Fonte: (PE AMERICAS, 2013)

3.5.3. Descrição do fluxo de processo

Esta seção descreve a fabricação de placas de lã mineral. As entradas do processo portão-ao-portão e saídas nas tabelas a seguir representam os dados coletados a partir de fabricantes tendo sido medidas com base na massa total produzida. As matérias-primas consumidas e as emissões produzidas por qualquer fabricante, no entanto, podem variar dependendo da formulação desse fabricante, equipamento, e controle da poluição do ar dispositivos em uso.

3.5.3.1. Produção

3.5.3.1.1. Fusão

A fabricação de placa de lã mineral requer várias etapas. Rocha, escória de alto forno, ou uma combinação dos dois é adicionada ao forno de cúpula. A energia necessária para derreter a rocha/escória é fornecida pelo coque com oxigênio injetado ao forno cúpula para melhorar a combustão. Outras matérias-primas são adicionadas à mistura já fundida de rocha e escória neste momento. Estes materiais variam entre os fabricantes, mas podem incluir areia, calcário, minério de ferro, basalto, cinzas e/ou cinza volante. Estes materiais estão descritos na Tabela 9. O material fundido é depois despejado em uma roda de fiação, onde a fibra é formada e rapidamente arrefecida, a força centrífuga da roda girando e sua combinação com a composição química do material em fusão, determina o diâmetro da fibra, e em última análise, a condutividade térmica das fibras de lã que são produzidas. A Tabela 10 ilustra as entradas no aparelho de fusão para placa de lã mineral por unidade funcional. Estes materiais são consumidos no aparelho de fusão (ou seja, usado como energia de processo) para produzir calor para o lote de fusão

Tabela 9 - Materiais do lote para produção da placa por unidade funcional.

| Materiais do Lote | Quant. | Un | Tipo |
|---------------------------|----------|----|---------------|
| Feldspato | 1,48E-01 | kg | Não renovável |
| Granito | 2,59E-03 | kg | Não renovável |
| Minério de ferro | 2,97E-01 | kg | Não renovável |
| Basalto | 5,63E-01 | kg | Não renovável |
| Cimento | 1,28E-02 | kg | Não renovável |
| Escória | 5,18E+00 | kg | Reciclável |
| Resíduos para reciclagem* | 1,80E-02 | kg | Reciclável |

* incluem pó de alto-forno, escória de alto forno e resíduo moído de produção

Fonte: (PE AMERICAS, 2013)

Tabela 10 - Entradas para produção da placa por unidade funcional

| Entradas de fusão | Quant. | Un |
|-------------------|----------|----|
| Carvão mineral | 8,65E+00 | MJ |
| Oxigênio líquido | 1,05E-01 | kg |

Fonte: (PE AMERICAS, 2013)

3.5.3.1.2. Preparação do aglomerante

Uma vez que o lote com as matérias-primas foi derretido e centrifugado, as placas são formadas. O aglomerante utilizado em sua produção é uma suspensão aquosa de formaldeído fenol (fenólico). O ligante fenol-formaldeído é específico para placas e representa um componente importante do produto. As matérias-primas para a produção do aglomerante estão incluídas no estudo, bem com as emissões associadas com sua cura do produto. A Tabela 11 relaciona os materiais aglutinantes para fabricação de placas de lã mineral por unidade funcional.

A EI da matéria-prima para materiais combustíveis é calculada na Tabela 11. De acordo com a ISO 14044 (ISO, 2006) esta energia representa calor de combustão de insumos de matérias-primas que não são utilizados como fontes de energia. Todos os outros materiais combustíveis (por exemplo, coque, gás natural etc.) são utilizados como combustível.

Tabela 11 - Energia de matéria-prima para materiais por unidade funcional

| Entradas de fusão | Quant. | Un |
|-------------------|----------|----|
| Carvão mineral | 8,65E+00 | MJ |
| Oxigênio líquido | 1,05E-01 | kg |

Fonte: (PE AMERICAS, 2013)

3.5.3.1.3. Conformação e acabamento

A fibra de lã, que é descarregada a partir da roda de fiar em cima da saída do forno cúpula é revestida com o aglomerante em suspensão. O ar pressurizado é utilizado para formar uma esteira de lã de rocha e uma correia de consolidação é utilizada para pressionar a placa de produto para a espessura e densidade desejadas. A cura é completada por convecção de ar quente. A queima do forno de cura é realizada com gás natural ou através de fonte elétrica. As placas acabadas são, então, cortadas com o tamanho necessário sendo em seguida embaladas. A embalagem do produto acabado requer o uso de película de retração

3.5.3.1.4. Transporte

A média de distâncias de transporte e modos de transporte foi incluída para o transporte da matéria-prima e insumos necessários às instalações de produção e montagem. Para o transporte de saída do produto final, foi assumido que a placa tem razão máxima de utilização do volume de 75% (PE AMERICAS, 2013).

A Tabela 12 ilustra esses dados.

Tabela 12 – Distancias de transporte associadas à placa da lâ de rocha

| Material | Distância | Unidade | Modal de transporte |
|-------------------|-----------|---------|---------------------|
| Entrada | | | |
| Escória | 99 | km | Caminhão |
| Basalto | 214 | km | Caminhão |
| Feldspato | 304 | km | Caminhão |
| Granito | 5 | km | Caminhão |
| Amônia | 74 | km | Caminhão |
| Resina fenólica | 448 | km | Caminhão |
| Silano | 710 | km | Caminhão |
| Carvão | 187 | km | Caminhão |
| Saída | | | |
| Produto | 667 | km | Caminhão |
| Resíduo | 30 | km | Caminhão |
| Fim da vida | | | |
| Produto ao aterro | 32 | km | Caminhão |

OBS. As distâncias em milhas foram convertidas para km

Fonte: (PE AMERICAS, 2013)

3.5.4. Resultados do inventário de indicadores

Os recursos materiais representam a quantidade de materiais consumidos para produzir não só o próprio isolamento, mas também as matérias-primas, energia elétrica, gás natural etc. que entram no ciclo de vida do produto. A subcategoria recursos materiais não-renováveis representa minérios e outros recursos minerais que são extraídos do solo e, posteriormente, processados, enquanto recursos materiais renováveis representam as entradas de ar ou de outros gases específicos da atmosfera. Ambas as categorias são calculadas com base em fluxos elementares - entradas da natureza que ainda não tenham sido alteradas pelo homem. Por exemplo, a entrada de dióxido de carbono atmosférico necessário para cultivar plantas seria um fluxo elementar e, portanto, contados na categoria recursos materiais renováveis. O uso de água fresca, apesar de um recurso material renovável, é relatado separadamente e representa entradas no sistema de produto. Essa mensuração representa a água incorporada e conta não só para insumos diretos de produção, mas também para os que são consumidos durante a fabricação do produto intermediário e

geração energia. As saídas ou lançamentos de água não são considerados. A energia primária representa a quantidade total de energia primária extraída da terra e é expressa na demanda de energia proveniente de fontes renováveis e os recursos não-renováveis. Inclui toda a energia utilizada na extração de matérias-primas e fabricação de produtos intermediários, bem como as perdas de transmissão. As eficiências em energia conversão são também levadas em consideração.

Os resíduos perigosos e não perigosos eliminados, juntamente com os resíduos de energia, também são relatados neste item. Bens de estoques e resíduos destinados a valorização foram separados e excluídos dos resultados do estudo. Além disso, todo o material é assumido para ser depositado em aterro, em vez de incinerados, sendo portanto indisponíveis para recuperação de energia.

Os resultados indicam que a maioria do consumo de recursos ocorre durante a fabricação, e foram quantificados com base nos fluxos elementares a partir do inventário de ciclo de vida. Os resultados representam todos os fluxos elementares de entrada atribuído a cada fase. Por exemplo, a utilização de água doce durante o fabrico não inclui somente uso da água direto na instalação de fabricação, mas também toda a água necessária para produzir a energia consumida pela fabricação. A geração de energia é responsável pela maioria do uso de água na fase de fabricação.

A maioria dos resíduos é gerada na fase de fim de vida, quando o isolamento é descartado. Uma parcela menor de resíduos é devida à produção e perda de instalação. A discriminação das energias renováveis e não-renováveis por recurso é mostrada na Tabela 13.

Tabela 13 - Indicadores de inventário de ciclo de vida da placa

| Indicadores | Matéria-prima | Produção | Transporte | Instalação | Fim da vida |
|--|---------------|----------|------------|------------|-------------|
| Recursos materiais não renováveis | 24,0% | 69,0% | 0,5% | 1,5% | 5,0% |
| Recursos materiais renováveis | 38,0% | 60,0% | 0,5% | 1,0% | 0,5% |
| Fontes primárias de energia não renováveis | 23,0% | 71,0% | 4,5% | 0,5% | 1,0% |
| Fontes primárias de energia renováveis | 43,0% | 55,3% | 0,2% | 0,5% | 1,0% |
| Água | 18,0% | 73,0% | 1,0% | 2,0% | 6,0% |
| Resíduos perigosos | 22,0% | 58,0% | 0,0% | 20,0% | 0,0% |
| Resíduos não perigosos | 0,0% | 35,0% | 2,0% | 0,0% | 63,0% |

Fonte: (PE AMERICAS, 2013)

3.5.4.1. Resultados da fase de produção

Os resultados apresentados abaixo ilustram o processo de produção na fábrica.

A fase de fusão e a fase de acabamento têm a contribuição mais significativa para o impacto ambiental:

Forno cúpula: 71% do PAG, principalmente devido à queima de coque, 64% do potencial de acidificação - principalmente devido às emissões do aparelho de fusão (por exemplo, SO₂), 46 % por poluição e 40 % da DEP – Demanda de Energia Primária.

Acabamento: 84% de Potencial de depleção do ozônio, principalmente devido ao uso de energia, 57% da EP - Eutrofização Potencial, principalmente devido ao uso de energia e 45% da DEP - principalmente devido ao uso de energia na usina e utilização de gás natural para aquecimento/cura.

O impacto do aglomerante é significativo, apesar de a sua pequena contribuição de massa (5%). A DEP para recursos renováveis é importante (36 %) devido à utilização de xarope de milho, bem como a EP, devido ao uso de amoníaco na produção de pasta.

O lote tem uma pequena contribuição para o impacto geral (menos do que 2%, com a exceção de poluição, a 5%), uma vez que a maior parte das matérias-primas, como a escória, são descartes de outros processos industriais e são considerados como tendo pouco ou nenhum impacto ambiental quando da entrada para o sistema de produto. Outros materiais que são extraídos, como basalto, mostram uma pequena carga ambiental em relação a outras partes do processo produtivo.

A Tabela 14 ilustra os resultados.

Tabela 14 – Resultados da fase de produção (detalhado)

| Impactos | Transporte para a Indústria | Manufatura | Transporte da Indústria | Disposição de resíduos | Total 1,00 m ² |
|---|-----------------------------|------------|-------------------------|------------------------|---------------------------|
| Demanda de energia primária não renovável (MJ) | 3,68 | 59,82 | 2,5 | 0,88 | 44,59 |
| Demanda de energia primária renovável (MJ) | 0,01 | 4,46 | - | 0,02 | 2,99 |
| Aquecimento Global da Atmosfera (kg CO ₂ Equiv.) | 0,26 | 4,46 | 0,1 | 0,08 | 3,27 |
| Acidificação do Ar (mol H ⁺ Equiv.) | 1,31E-02 | 1,85E+00 | 8,98E-03 | 1,00E-02 | 1,25E+00 |
| Eutrofização (kg N – Equiv.) | 9,05E-06 | 8,76E-04 | 6,25E-06 | 8,35E-06 | 6,00E-04 |
| Impactos | Transporte para a Indústria | Manufatura | Transporte da Indústria | Disposição de resíduos | Total 1,00 m ² |
| Redução da camada de ozônio (kg CFC 11 – Equiv.) | 5,82E-10 | 1,26E-07 | 3,96E-10 | 4,22E-10 | 8,47E-08 |
| Poluição do Ar (Inclusive NO _x – Equiv.) (kg NO _x – Equiv.) | 1,81E-07 | 6,25E-06 | 1,25E-07 | 1,57E-07 | 4,47E-06 |

Fonte: (PE AMERICAS, 2010)

3.6. A ENERGIA INCORPORADA NA LÃ DE ROCHA NO BRASIL

O estudo da EI nos isolantes térmicos no Brasil ainda está nos seus primórdios. As informações constantes desse tópico foram obtidas através de entrevista realizada em uma indústria produtora de lã de rocha, conforme descrito adiante.

Os dados a seguir descritos computam a energia dispendida para fazer chegar os insumos até a indústria e a produção da lã de rocha, não estando computados os valores após a saída do material da fábrica.

Os dados obtidos através do relatório da NAIMA, permitiram a elaboração da seção que trata da EI na lã de rocha nos Estados Unidos.

Das indústrias consultadas quando do início da pesquisa somente a Rockfibras, mostrou interesse em fornecer alguns dados que permitissem uma comparação entre o processo produtivo brasileiro e o americano. Utilizando-se o relatório da NAIMA como modelo buscou-se junto àquela indústria a obtenção de dados similares aos do relatório americano. Alguns dados não são coletados pela indústria e alguns são considerados sigilosos. Nestes casos foram considerados os valores do relatório da NAIMA.

Visando situar a Rockfibras no mercado necessário buscou-se algumas

informações sobre essa indústria.

3.6.1. Rockfibras isolantes térmicos e acústicos

3.6.1.1. História

Em 20 de abril de 1960 a Rockwoolbras S/A Indústria de Isolantes termoacústicos iniciou suas atividades no Brasil, produzindo isolantes térmicos à base de lã de rocha na fábrica localizada em Guararema - SP. Logo em seguida passou a fabricar também o silicato de cálcio, isento de amianto.

Em março de 1979 a Ocfibras Ltda, posteriormente denominada Owens-Corning Fiberglass Ltda. (1991), adquiriu o controle acionário da Rockwoolbras S/A.

Em julho de 1993 a Rockfibras do Brasil Indústria e Comércio Ltda. assumiu o controle da Divisão de Isolantes da Owens-Corning Fiberglass dando continuidade à fabricação e comercialização de isolantes térmicos e acústicos, tendo como principais produtos de sua linha a lã de rocha THERMAX® e o silicato de cálcio ROCK-SIL® - isento de amianto.

A fábrica de Boituva-SP foi adquirida em 1995 e reconstruída no ano seguinte. Dedicar-se à produção de lã de basalto e peças moldadas para silenciosos automotivos. A Figura 11 ilustra a vista aérea da indústria de Boituva – SP.



Figura 11 – Fábrica Rockfibras em Boituva – SP
Fonte: (ROCKFIBRAS, 2012a)

Em 2001 e 2004 foram colocadas em operação, na fábrica de Guararema, as novas linhas de produção de lã de rocha THERMAX® com a mais recente tecnologia e maquinário, importados da Suécia.



Quadro 1 - Fábrica Rockfibras em Guararema – SP

Fonte: (ROCKFIBRAS, 2012b)

A aquisição da DBW do Brasil Ltda., em 2003, e sua transferência de Itapira-SP para Boituva, elevou a capacidade produtiva da unidade e proporcionou aumento nas exportações.

Posteriormente em 2007, foi concluído em Guararema o plano de atualização tecnológica e aumento da capacidade de produção da lã de rocha THERMAX® e do silicato de cálcio ROCK-SIL®. Além de incorporar todos os avanços tecnológicos disponíveis, a ROCKFIBRAS passou a contar com a capacidade de produção superior a três vezes o consumo nacional de lã de rocha e em nível compatível à demanda do mercado de silicato de cálcio.

Estes investimentos, voltados ao objetivo da empresa de melhoria contínua e aliados ao experiente e qualificado corpo de funcionários, contribuem para que nossos preços, prazos de entrega, qualidade dos produtos e atendimento, correspondam efetivamente às expectativas do mercado.

3.6.1.2. Perfil atual da Rockfibras

O grupo possui as instalações industriais de:

- **Guararema - SP**

Terreno: 50.000 m²

Construções: 15.000 m²

Pessoal: 250

Produtos: lã de rocha e silicato de cálcio

- **Boituva - SP**

Terreno: 90.000m²

Construções: 6.000 m²

Pessoal: 100

Produtos: lã de basalto e peças moldadas

- **Cambuí - MG**

Produtos: peças moldadas

- **São Bento do Sul - SC**

Produtos: peças moldadas

Possui sua administração e escritório de vendas na cidade de São Paulo.

É também certificada de acordo com a norma ISO 9001:2008.

3.6.2. Visão geral do ciclo de vida

O ciclo de vida da placa de lã de rocha de 1,00m² produzida no Brasil é similar ao americano, desse modo foram utilizados os dados do modelo americano.

Os materiais são fundidos e combinados com o aglomerante, após a produção das fibras de rocha. São em seguida comprimidos para a obtenção da densidade necessária. Após os períodos de cura e arrefecimento são cortados na forma desejada e empacotados.

3.6.3. Descrição do fluxo de processo

Esta seção descreve a fabricação de placas de lã mineral. As entradas do processo portão-ao-portão e saídas nas tabelas a seguir representam os dados coletados na Rockfibras medidas com base na massa total produzida. Não foi possível a obtenção dos dados necessários para a elaboração do estudo de caso, ou por que não são coletados ou por questões de sigilo. Nestes casos foram utilizados os valores encontrados e descritos nos relatórios da NAIMA (PE AMERICAS, 2010; 2013).

Tendo em vista a variabilidade dos dados levantados pela NAIMA e aqueles coletados na Rockfibras e a margem de erro provável existente nas medições e levantamentos optou-se por considerar os valores praticados nos EUA e no Brasil, idênticos em sua quase totalidade, aqueles mais relevantes foram objeto de tratamento diferenciado e estão descritos no trabalho.

3.6.3.1. Produção

3.6.3.1.1. Fusão

O processo de produção da placa de lã mineral no Brasil é similar ao modelo dos Estados Unidos.

3.6.3.1.2. Preparação do aglomerante

Após a produção das fibras minerais há a necessidade de sua aglutinação e compressão, sendo utilizado o aglomerante para esse fim. O aglomerante utilizado na Rockfibras é similar ao utilizado no modelo americano. A Tabela 15 ilustra esses dados. Conforme pode ser observado, a quantidade de carvão mineral passou de 8,65E+00 para 10,17E00 MJ, representando um acréscimo de 1,52E+00 e que corresponde a um incremento percentual de 6,69%. Tendo em vista a variabilidade dos dados levantados pela NAIMA e aqueles

Tabela 15 - Entradas para produção da placa por unidade funcional

| Entradas de fusão | NAIMA | | Rockfibras | |
|-------------------|----------|----|------------|----|
| | Quant. | Un | Quant. | Un |
| Carvão mineral | 8,65E+00 | MJ | 10,17E+00 | MJ |
| Oxigênio líquido | 1,05E-01 | kg | 1,05E-01 | kg |

Fonte: (MOTTA, 2013a; PE AMERICAS, 2013)

Em sua pesquisa, Tavares (2006) apud (IFIB, 1995) apresenta o consumo energético associado aos transportes consoante com o ilustrado na Tabela 16.

3.6.3.1.3. Consumo Energético associado ao transporte

Os valores de EI necessários para o transporte de insumos para a indústria e da indústria ao destino final do produto, são diferentes no Brasil.

A

Tabela 16 ilustra esses valores.

Tabela 16 – Consumo energético associado aos meios de transporte

| Meio de Transporte | MJ/km/t |
|-----------------------------|---------|
| Navio de carga em hidrovias | 0,93 |
| Navio de carga oceânico | 0,13 |
| Van de entrega (< 3,5t) | 11,10 |
| Caminhão 16 t | 5,17 |
| Caminhão 28 t | 3,56 |
| Caminhão 40 t | 2,54 |
| Carro de passeio | 5,15 |
| Trem de carga | 1,50 |

Fonte: (TAVARES, 2006) apud (IFIB, 1995)

3.6.3.1.4. Dados complementares

Este item ilustra os valores associados ao processo e que foram fornecidos pela Rockfibras (MOTTA, 2013a).

A energia elétrica representa um consumo de 1,044 MJ/kg de produto. O coque tem um consumo de 6,876 MJ/kg de produto. E o processo como um todo consome 9,828 GJ/kg de produto.

Alguns aspectos de produção tiveram registro fotográfico que estão ilustrados da Figura 12 à Figura 17. Todas as fotos são do autor.



Figura 12 – Aspecto geral da indústria



Figura 13 – Caçamba com os agregados, subindo para descarga no forno



Figura 14 – Saída da rocha fundida, sobre os rolos centrífgugos.

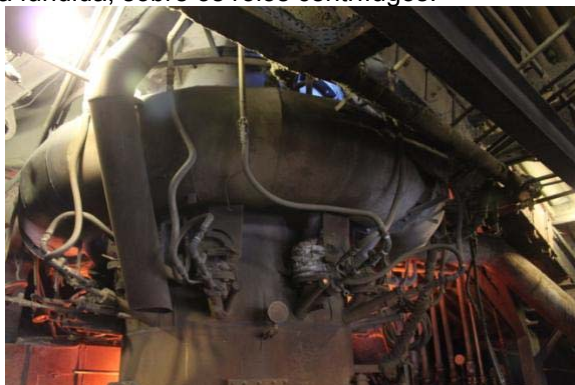


Figura 15 – Parte inferior do forno



Figura 16 – Vista da entrada da caixa onde os filamentos de lã de rocha entram e são pulverizados com o aglomerante para em seguida serem calandrados



Figura 17 – Após sair da caixa de colocação do aglomerante e entrar na calandra para a produção da lã com as espessuras comerciais a manta é aparada lateralmente dos dois lados, deixando as rebarbas que são reaproveitadas no processo.

O processo de produção da lã de rocha pode ser demonstrado visualmente na Figura 18 visando sua melhor compreensão.

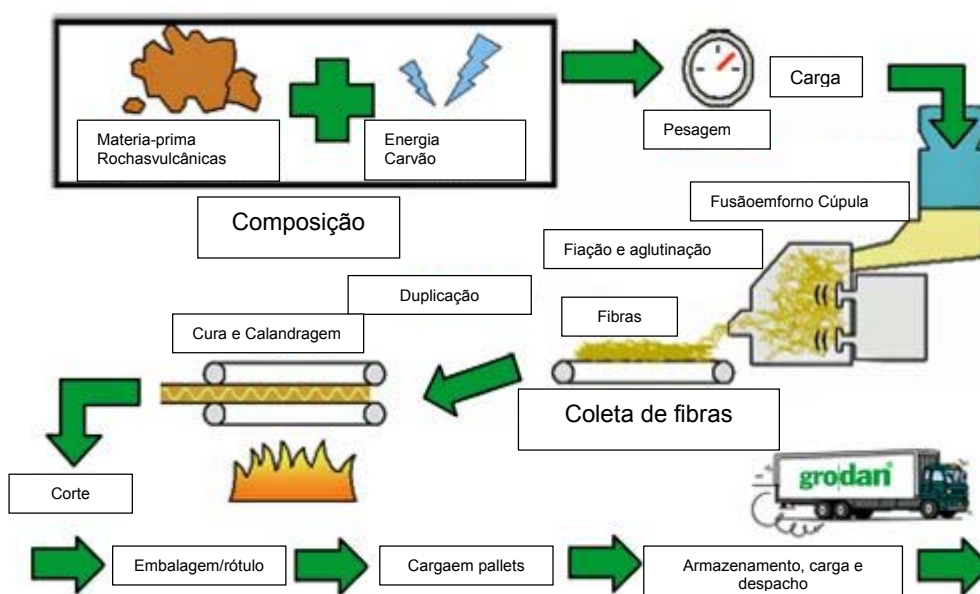


Figura 18 – Esquema da produção de lã de rocha
Fonte: (GRODAN, 2004)

3.6.4. Inventário do portão ao portão na indústria

Esta seção apresenta as principais entradas e saídas para a etapa de fabricação só (ou seja, materiais que entram na indústria, produção, resíduos e emissões que ocorrem no nível da planta) e replica os dados da NAIMA por falta desses na indústria.

A Tabela 17 ilustra as entradas e saídas do portão ao portão, para 1m² de placa.

Tabela 17 – Entradas e saídas do portão ao portão, para 1m² de placa.

| ENTRADAS | Insumo | NAIMA | | ROCKFIBRAS | |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| Matéria-prima | Feldspato | $2,90 \times 10^{-1}$ | kg | $2,90 \times 10^{-1}$ | kg |
| | Granito | $5,06 \times 10^{-3}$ | kg | $5,06 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Minério de ferro | $5,80 \times 10^{-3}$ | kg | $5,80 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Basalto | $1,10 \times 100$ | kg | $1,10 \times 100$ | kg |
| | Cimento | $5,05 \times 10^{-2}$ | kg | $5,05 \times 10^{-2}$ | kg |
| | Escória | $1,29 \times 10^0$ | kg | $1,29 \times 10^0$ | kg |
| | Resíduos para reciclagem* | $1,43 \times 10^0$ | kg | $1,43 \times 10^0$ | kg |
| Fusão | Carvão mineral | 16,9 | MJ | 17,17 | MJ |
| | Oxigênio líquido | $2,05 \times 10^{-1}$ | kg | $2,05 \times 10^{-1}$ | kg |
| | Amônia | $3,38 \times 10^{-3}$ | kg | $3,38 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Sulfato de amônia | $1,75 \times 10^{-3}$ | kg | $1,75 \times 10^{-3}$ | kg |
| Aglomerante | Resina fenólica | $1,07 \times 10^{-1}$ | kg | $1,07 \times 10^{-1}$ | kg |
| | Xarope de milho | $8,40 \times 10^{-3}$ | kg | $8,40 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Silano | $2,87 \times 10^{-3}$ | kg | $2,87 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Ureia | $6,68 \times 10^{-2}$ | kg | $6,68 \times 10^{-2}$ | kg |
| | Gás natural | 7,68 | MJ | 7,68 | MJ |
| Acabamento e etapas posteriores | Eletricidade | 3,87 | MJ | 1,66 | MJ |
| | Água | $1,32 \times 10^0$ | kg | $1,32 \times 10^0$ | kg |
| | Diesel | $1,22 \times 10^{-3}$ | kg | $1,22 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Combustível de óleo leve | $6,23 \times 10^{-5}$ | kg | $6,23 \times 10^{-5}$ | kg |
| | Propano | $3,37 \times 10^{-3}$ | kg | $3,37 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Embalagem | $6,78 \times 10^{-2}$ | kg | $6,78 \times 10^{-2}$ | kg |
| | Óleo do processo | $5,51 \times 10^{-3}$ | kg | $5,51 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Placa | 3,36 | kg | 3,36 | kg |

| SAÍDAS | Insumo | NAIMA | | ROCKFIBRAS | |
|----------------|-----------------------|------------------------|----|------------------------|----|
| Produto final | Sulfeto de carbonila | $2,00 \times 10^{-3}$ | kg | $2,00 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Chumbo (+II) | $8,08 \times 10^{-11}$ | kg | $8,08 \times 10^{-11}$ | kg |
| Emissões ao ar | Amônia | $1,55 \times 10^{-3}$ | kg | $1,55 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Dióxido de carbono | $2,57 \times 10^0$ | kg | $2,57 \times 10^0$ | kg |
| | Monóxido de carbono | $4,09 \times 10^{-3}$ | kg | $4,09 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Sulfeto de hidrogênio | $1,18 \times 10^{-4}$ | kg | $1,18 \times 10^{-4}$ | kg |
| | Dióxido de nitrogênio | $1,01 \times 10^{-3}$ | kg | $1,01 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Óxidos de nitrogênio | $2,00 \times 10^{-3}$ | kg | $2,00 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Vapor | $6,73 \times 10^{-1}$ | kg | $6,73 \times 10^{-1}$ | kg |
| | Dióxido de enxofre | $2,01 \times 10^{-2}$ | kg | $2,01 \times 10^{-2}$ | kg |

| SAÍDAS | Insumo | NAIMA | | ROCKFIBRAS | |
|----------------|---|-----------------------|----|-----------------------|----|
| | | | | | |
| | Formaldeído (metanol) | $6,08 \times 10^{-7}$ | kg | $6,08 \times 10^{-7}$ | kg |
| | Metanol | $6,08 \times 10^{-7}$ | kg | $6,08 \times 10^{-7}$ | kg |
| | Componentes orgânicos voláteis não especificados) | $3,21 \times 10^{-3}$ | kg | $3,21 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Hidrocarbonetos (não especificados) | $1,24 \times 10^{-5}$ | kg | $1,24 \times 10^{-5}$ | kg |
| | Partículas (PM10) | $2,08 \times 10^{-3}$ | kg | $2,08 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Partículas (PM2,5 – PM10) | $9,17 \times 10^{-5}$ | kg | $9,17 \times 10^{-5}$ | kg |
| | Partículas (PM2,5) | $2,5 \times 10^{-3}$ | kg | $2,5 \times 10^{-3}$ | kg |
| Emissões ao ar | Partículas (não especificadas) | $1,73 \times 10^{-3}$ | kg | $1,73 \times 10^{-3}$ | kg |
| | Águas residuais | $1,23 \times 10^0$ | kg | $1,23 \times 10^0$ | kg |
| | Sólidos em suspensão | $4,38 \times 10^{-4}$ | kg | $4,38 \times 10^{-4}$ | kg |

| ENTRADAS | Insumo | NAIMA | | ROCKFIBRAS | |
|--------------------------|--|-------------|----|-------------|----|
| Emissões para água limpa | Resíduos moídos | 0,113403967 | kg | 0,113403967 | kg |
| | Coque | 0,014107508 | kg | 0,014107508 | kg |
| | Compostos ferrosos (não especificados) | 0,06628829 | kg | 0,06628829 | kg |
| Resíduos | Resíduos sólidos | 1,653607284 | kg | 1,653607284 | kg |
| | Cinza volante (não especificada) | 0,018340327 | kg | 0,018340327 | kg |

* O resíduo para reciclagem inclui pó de alto-forno, a escória de alto-forno e resíduos moído (de produção).

Fonte: (PE AMERICAS, 2010; MOTTA, 2013a)

Conforme pode ser observado houve pequena variação no consumo de carvão mineral estando o valor da NAIMA em 16,9 MJ e o da Rockfibras em 17,17 MJ, diferença que foi desconsiderada apesar de mostrada. Outro valor que apresentou diferença foi o do consumo de eletricidade com 3,87 MJ para a NAIMA e 1,66 MJ para a Rockfibras.

3.6.5. Resultados do inventário de indicadores

Os recursos materiais representam a quantidade de materiais consumidos para produzir não só o próprio isolamento, mas também as matérias-primas, energia elétrica, gás natural etc. que entram no ciclo de vida do produto. A subcategoria recursos materiais não-renováveis representa minérios e outros recursos minerais que são extraídos do solo e, posteriormente, processados, enquanto recursos materiais renováveis representam as entradas de ar ou de outros gases específicos da atmosfera.

Em seu trabalho Cheng, Lin e Huang (2011) propõe que para resolver o problema de eliminação de resíduos de lã de rocha, a sua reciclagem na indústria de concreto pode ser a aplicação mais viável. O estudo realiza uma série de testes de laboratório em concreto contendo várias quantidades de resíduos de lã de rocha. Foram também testados e avaliados o índice de pozolanicidade, a resistência à compressão, tração na compressão, resistência à abrasão, a resistividade, e a absorção de cloretos, tendo sido investigados também os testes de penetração.

Os dados iniciais dos insumos utilizados para produção da lã de rocha e necessários ao desenvolvimento da dissertação constam da Tabela 18.

Tabela 18 – Insumos utilizados na produção de lã de rocha e distâncias

| Material | Distância |
|-------------|-----------|
| Coque | 956 km |
| Escória | 250 km |
| Fundente | 500 km |
| Aglomerante | 24 km |

Fonte: (MOTTA, 2013b)

A Tabela 19 ilustra os dados iniciais dos combustíveis utilizados no processo.

Tabela 19 – Combustíveis utilizados na produção de lã de rocha e distâncias

| Material | kWh/kg | Distância |
|--|--------|-----------|
| Óleo combustível pesado (BPF) ⁹ | 0,37 | 40 km |
| Óleo Diesel | 0,16 | 40 km |

Fonte: (MOTTA, 2013b)

3.7. ENERGIA DE OPERAÇÃO

3.7.1. A cidade de Curitiba - contextualização

Curitiba tem uma localização especial de um ponto de vista geográfico. A cidade está ao sul do Trópico de Capricórnio, tendo como resultado uma que os raios do sol incidem com altitude de 88° no verão e 41° no inverno, sendo portanto alta sua intensidade de radiação (SAMOJEDEN, 2013).

Embora a cidade esteja apenas a 100 km da costa do Atlântico, Curitiba está

⁹O óleo combustível (em inglês *Fuel Oil*, como é tratado em muitas empresas petrolíferas e seus clientes industriais) é um derivado de petróleo. É também tratado como óleo combustível pesado ou ainda como óleo combustível residual, é a fração residual da destilação das frações mais leves de petróleo, como a gasolina, a nafta, o querosene e o óleo diesel (embora sob certos aspectos e algumas variações, especialmente as não voláteis, este seja um óleo combustível), entre outros, designadas em geral como *frações pesadas*, obtidas em várias etapas e processos do *refino*.

Os óleos combustíveis podem ser classificados com relação a sua viscosidade, basicamente em:

- Óleos combustíveis leves
- Óleos combustíveis pesados
 - São divididos por sua vez em óleos APF (de alto ponto de fluidez) e óleos BPF (baixo ponto de fluidez). São utilizados em motores de grande porte e de baixa rotação, como os motores de grandes navios (WIKIPEDIA, 2013).

localizada em um planalto com altitude média de 934 m, o que a torna muito suscetível ao vento. Como a Serra do Mar está localizada na estreita faixa entre a cidade e o mar, uma cadeia de montanhas, que também abriga a mata atlântica, a floresta tropical com o seu próprio micro- clima produz em Curitiba uma umidade muito alta e, portanto, a ocorrência de nevoeiro frequente. A umidade relativa média anual é de 78,87 %. Em outubro de 2000, a umidade relativa do ar foi de 98,5 %. A interação de todos esses fatores influenciam as condições climáticas da região, de modo que o clima em Curitiba é atípico para o Brasil (LINDMAIER, 2013).

3.7.2. Composição do invólucro

O modelo selecionado para este estudo, foi o R1-N da Norma Brasileira NBR 12721 (ABNT, 2006) que especifica os materiais utilizados na edificação como um todo (fechamento de superfícies, estrutura, acabamentos e demais itens componentes. Trata também dos elementos construtivos do invólucro da edificação (superfícies/fechamentos) quanto à composição de materiais que os formam. Os materiais necessários para a execução de cada metro quadrado de superfície de alvenaria e suas camadas e os dados que serviram de base para o modelo (A), foram obtidos do trabalho de Graf (2011).

O estudo trata das propriedades isolantes térmicas da lã de rocha. Esse isolante térmico será colocado nas paredes externas, ou seja aquelas que compõe o envoltório da edificação. Esta é composta por todas as superfícies que envolvem as zonas térmicas que são formadas pelos ambientes.

Essas superfícies são aquelas que tem contato com o ar exterior e estão listadas no Quadro 2.

| Superfícies | Elementos construtivos | Descrição |
|-------------|------------------------|---|
| Laterais | Parede de uma vez | Paredes mais espessuras usadas no perímetro da edificação |
| | Janela | Vidro e alumínio em aberturas acima do peitoril |
| | Porta | Madeira em aberturas de passagem (sem peitoril) |
| Superiores | Laje de forro | Laje superior entre o sótão e os cômodos |
| | Cobertura | Telhas e estrutura acima da laje de forro |
| Inferiores | Laje de piso | Laje entre os cômodos e o solo |

Quadro 2 - Elementos construtivos que compõem as superfícies do invólucro da edificação R1-N
Fonte: (GRAF, H.F., 2011)

3.7.2.1. Cálculos complementares

A NBR 12721 (ABNT, 2006) especifica a quantidade de esquadrias de correr de alumínio anodizado natural, além daquelas, também de correr, de chapa de aço dobrada. As janelas de aço, representam 11,02% do total das janelas, sendo consideradas como janelas de alumínio anodizado natural para fins de simplificação dos cálculos, tendo em vista que essa alteração tem um peso muito baixo no cálculo da EI conforme ilustrado na Tabela 20.

Tabela 20 - Cálculo da porcentagem de janelas de chapa e de alumínio

| Material | Quantidade (m ²) | Porcentagem (%) |
|--|------------------------------|-----------------|
| Total de janelas (por m ² da edificação) | 0,10628 | 100,00 |
| Esquadrias de correr de alumínio anodizado natural ¹⁰ | 0,09457 | 88,98 |
| Janela de correr de chapa dobrada ¹⁰ | 0,01171 | 11,02 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, H.F., 2011)

Para fins de simplificação dos cálculos e à vista a diferença que esta modificação poderia produzir no resultado final, optou-se por considerar-se que todas as esquadrias seriam de alumínio anodizado.

Com base nas quantidades de janelas por m² da edificação de 0,10628 m² (Tabela 20) e do montante de vidro ditado pela NBR 12721 (ABNT, 2006) de 0,09062 m², obtém-se a porcentagem de esquadria e vidro, sendo a área de janela da construção de 85,27% de vidro liso transparente de 4 mm e 14,73% de esquadria de alumínio anodizado natural executada em perfil 25, conforme ilustrado na Tabela 21.

Tabela 21 - Cálculo da porcentagem de esquadria em relação ao vidro nas janelas

| Material | Quantidade (m ²) | Porcentagem (%) |
|---|------------------------------|-----------------|
| Janelas ¹¹ | 0,10628 | 100,00 |
| Vidro liso transparente 4 mm colocado com massa ¹⁰ | 0,09062 | 85,27 |
| Esquadrias de correr de alumínio anodizado natural | 0,01566 | 14,73 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, H.F., 2011)

3.7.2.2. Composição dos elementos construtivos da edificação

A composição dos elementos de construção da edificação tomou por base o trabalho da NBR 12721 (ABNT, 2006) e de Graf (2011).

3.7.3. Variações das características do invólucro da edificação

Ao longo do ano, as estações climáticas são alteradas, tendo em vista os solstícios de inverno e verão, que produzem as temperaturas mais quentes ou mais

¹⁰ Quantidade apresentada pela ABNT (2006)

¹¹ Quantidade calculada na Tabela 21.

frias e as mais amenas, nos meses entre esses períodos. Desse modo o estudo buscou realizar a simulação para três tipos de invólucro.

O invólucro padrão, é o padrão R1-N que tem similaridade com edificações de Curitiba, constituído de alvenarias externas de uma vez, laje no piso e forro, com cobertura de fibrocimento, com esquadrias de alumínio, 88,98% m² da área de janelas externas e 11,02% de janelas com chapa de aço dobrada com vidro e que foram calculadas como se fossem de alumínio com vidro, recebeu a nomenclatura de modelo (A).

O modelo seguinte que acrescenta a lã de rocha e gesso cartonado e pintura PVA no lado de dentro das paredes externas recebeu a denominação de modelo (B).

O terceiro modelo, que recebeu a denominação de modelo (C), recebeu lã de rocha com gesso cartonado e pintura PVA nas paredes e tetos.

O último modelo incorpora, além da lã de rocha e pintura PVA, esquadrias com vidros duplos em substituição aos existentes e recebeu a denominação de modelo (D).

Com base nesses dados foi feito o cálculo da EI em cada um dos modelos permitindo assim sua projeção para um ciclo de vida de cinquenta anos e sua comparação.

3.7.4. Quantitativo das superfícies

O objetivo deste tópico é a simulação do cálculo da EI em uma edificação padrão R1-N consoante com a norma NBR 12721 (ABNT, 2006).

Foram realizadas simulações para o cálculo da EI da construção sem isolamento térmico acrescido da energia de operação em um ciclo de vida de 50 anos.

Foi realizado o mesmo processo com a inclusão do isolamento térmico na residência calculando-se o acréscimo de EI na fase de implantação acrescida da EI de operação para o mesmo ciclo de vida.

Em sua pesquisa, Graf (2011) faz um estudo sobre o modelo R1-N constante da NBR 12721 (ABNT, 2006). O trabalho fez o aproveitamento dos quantitativos obtidos pela autora quando da utilização desse modelo, bem como da EI para a edificação da residência, utilizando os materiais e especificações que serviram de base para seu cálculo. Todos os valores e dados utilizados neste trabalho que tiveram a fonte de dados do trabalho de Graf (2011) foram indicados.

Os quantitativos utilizaram o modelo R1-N ilustrado na Figura 19. Os dados

apontam que as paredes externas com 38,14%, as lajes de forro com 24,97%, acrescidas da cobertura com 1,77%, a laje de piso com 22,38% representa a maior parte da área superficial da residência, respectivamente. Considerando a espessura dos elementos, as paredes externas, a lajes de forro e as lajes de piso representam a maior quantidade em volume da edificação conforme ilustrado na

A Tabela 22 ilustra o quantitativo das superfícies da edificação R1-N.

Tabela 22. O projeto padrão objeto desta pesquisa que teve como palco a cidade de Curitiba – PR, é o R1-N com 3 dormitórios, sendo um suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda com 106,44m² de área,

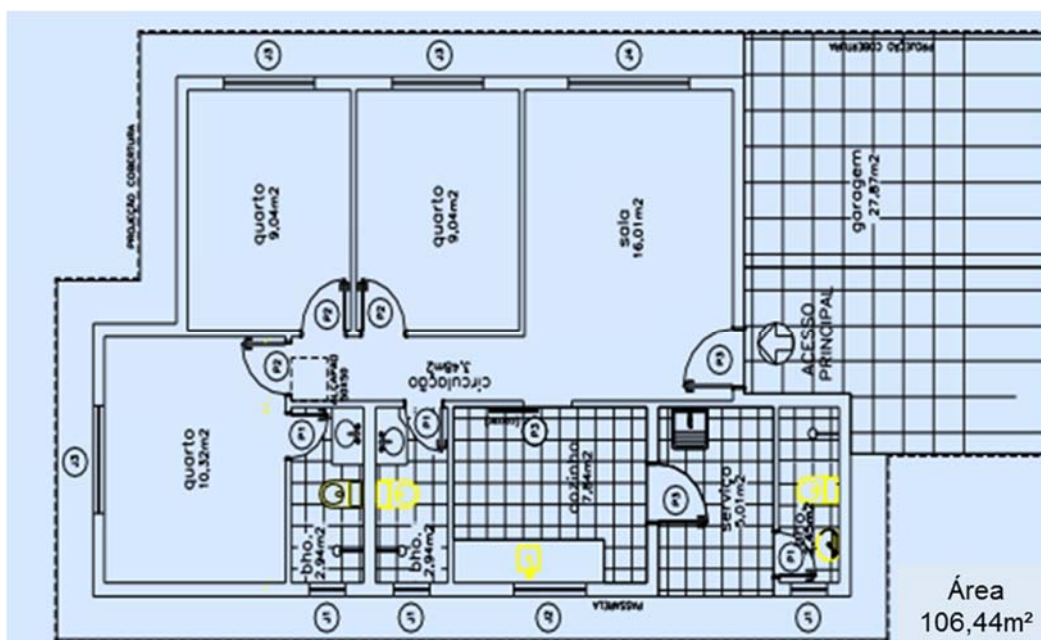


Figura 19 – Projeto da edificação padrão R1-N

Fonte: (SINDUSCON-MG, 2007)

A Tabela 22 ilustra o quantitativo das superfícies da edificação R1-N.

Tabela 22 - Quantitativo das superfícies da edificação R1-N

| Elementos construtivos | Quantidade de área de superfície (m²) | Porcentagem por área de superfície |
|------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Parede ½ vez | 69,92 | 12,89% |
| Parede 1 vez | 115,85 | 21,36% |
| Janela | 11,40 | 2,10% |
| Porta | 14,74 | 2,72% |
| Laje de forro | 128,11 | 23,62% |
| Cobertura | 132,63 | 24,46% |
| Laje de piso | 69,64 | 12,84% |
| | 542,28 | 100,00% |

Fonte: O autor, com base em (GRAF, H.F., 2011), no projeto arquitetônico da R1-N e na Tabela 21.

3.7.5. Energia Incorporada

Os valores de EI utilizados por Tavares (2006) foram empregados para calcular a EI neste estudo. Os materiais que compõe o invólucro da edificação R1-N estão ilustrados no Quadro 3. A análise da EI limitar-se-á ao invólucro da construção que contém as superfícies envolventes das zonas térmicas formadas por cada um dos ambientes. Esse invólucro é composto pelas superfícies externas, que são aquelas em contato com o exterior e as internas, que são compostas pelas laterais, superiores e inferiores. As paredes externas são executadas em alvenaria de uma vez e as internas de meia vez. Os vãos são preenchidos por esquadrias com portas e janelas. As superfícies superiores são compostas pela laje de forro que separa os ambientes do sótão e a cobertura que faz a divisão entre o sótão e o exterior. As superfícies inferiores são as que separam os ambientes do solo.

3.7.6. Transmitância térmica

Os cálculos objeto do estudo tomaram como metodologia a NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005). Essa norma define seções e camadas para fins de cálculo, considerando seção uma parte da espessura do componente que contém, apenas resistências térmicas em série e camada uma parte dessa seção, onde várias camadas podem compor uma seção.

O modelo R1-N ilustra a vista em perspectiva de parede de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces (ABNT, 2005). A norma cita no item C.3, exemplo 3 o modelo da figura C.4, sendo a seção C composta de:

Seção C (reboco + tijolo + câmara de ar + tijolo + tijolo + câmara de ar + reboco).

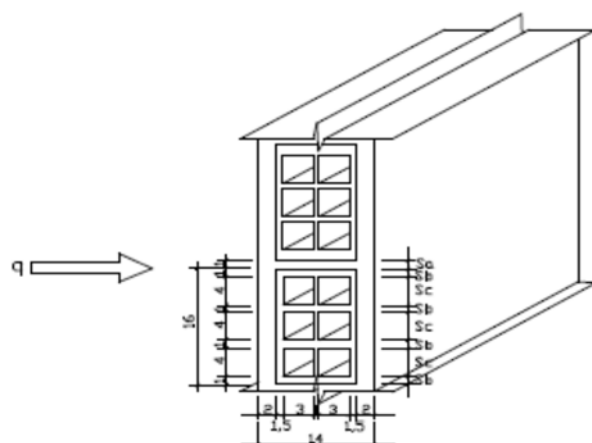


Figura 20 – Vista em perspectiva da parede utilizada no padrão R1-N
Fonte: (ABNT, 2005)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trata da EI necessária para a edificação da construção e EO em cada um dos modelos, ilustra os resultados da aplicação da metodologia nos modelos (A), (B), (C) e (D). Os dados que serviram de base para a obtenção dos resultados foram retirados de GRAF, H. F. (2011) e NAIMA (PE AMERICAS, 2010; 2013).

4.1. DADOS PRELIMINARES

Os elementos que compõe o envelope da edificação tiveram os dados de valor-U¹² obtidos conforme ilustrado no Quadro 3.

| Descrição | Valor-U W/m ² °C | Fonte |
|-----------------------------------|--------------------------------|---|
| Paredes externas e23 | 2,620 | O Autor com base em (GRAF, H. F., 2011) |
| Paredes externas e13 | 1,940 | O Autor com base em (GRAF, H. F., 2011) |
| Portas externas | 3,100 | (GRAF, H. F., 2011) |
| Janelas Externas | 5,750 | (GRAF, H. F., 2011) |
| Laje Total | 2,890 | (GRAF, H. F., 2011) |
| Cobertura Total | 4,460 | (GRAF, H. F., 2011) |
| Esquadrias Al Vidro duplo Argônio | 2,600 | (CHAPMAN, 2012) |
| Gesso Cartonado | 0,033 | (SIG TECHNICAL INSULATION, 2006) |
| Lã rocha | 0,034 | (SIG TECHNICAL INSULATION, 2006) |
| Massa PVA | | Impacto pouco significativo. Já considerado na parede de 1 e 1/2vez |
| Tinta PVA | | Impacto pouco significativo. Já considerado na parede de 1 e 1/2vez |
| Filme parede | 0,123 | (ARCHTOOLBOX, 2014) |
| Filme teto | 0,176 | (ARCHTOOLBOX, 2014) |
| Filme cobertura | 0,025 | (ARCHTOOLBOX, 2014) |

Quadro 3 – Dados de valor-U utilizados nos cálculos.

Fonte: indicada.

4.2. QUANTIDADE DE ENERGIA INCORPORADA EM CADA UM DOS MODELOS

Esse item trata da EI de cada um dos modelos necessária à climatização da edificação. São apresentados a seguir cada um dos modelos utilizados no trabalho com uma breve descrição de suas características.

¹² O valor-U é uma medida de perda de calor em um elemento de construção, como uma parede, piso ou teto. Também pode ser referido como um coeficiente transferência de calor global e mede o quão bem as partes da construção transferem calor. Isto significa que o quanto maior o valor-U, pior o desempenho térmico da envolvente do edifício. Um valor-U geralmente indica altos níveis de isolamento. Eles são úteis, uma vez que é um meio de prever o comportamento de todo o composto de um elemento de construção em vez de depender das propriedades dos materiais individuais (BRENAN, 2006)

4.2.1. Modelo (A) edificação R1-N em sua condição original de construção

Este modelo mantém as características originais de edificação, sem incorporação de qualquer elemento que altere suas condições térmicas. Em seu trabalho, Graf (2011) descreve a EI utilizada na edificação, tendo utilizado os dados de Tavares (2006). Nesse modelo a autora identificou o montante da ordem de 329,99 GJ para a construção da edificação, conforme consta da Tabela 23. Os dados para obtenção dos valores de EI foram obtidos com base nos elementos construtivos constituintes da edificação conforme ilustrado na Tabela 23.

Tabela 23 – EI nos elementos construtivos do modelo (A)

| Modelo A | | | |
|------------------------|--------|---------------------------------|---------------------|
| Elementos construtivos | Área | Total EI (MJ) m ² | Total de EI (MJ) |
| Parede de 1/2 vez | 69,92 | 465 | 32.512,80 |
| Parede 1 vez | 115,85 | 911 | 105.539,35 |
| Janela | 11,40 | 2.248 | 25.627,20 |
| Porta | 14,74 | 93 | 1.370,82 |
| Laje de forro | 128,11 | 672 | 86.089,92 |
| Cobertura | 132,63 | 80 | 10.610,40 |
| Laje de piso | 69,64 | 980 | 68.247,20 |
| Total | | | 329.997,69 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

4.2.2. Modelo (B) com a incorporação de lã de vidro nas paredes externas

Este modelo utiliza como base o modelo (A) e teve o acréscimo da lã de rocha com revestimento de gesso cartonado e acabamento com emassamento com massa a base de PVA e pintura látex a base de PVA, na face interna das paredes externas e ao redor das esquadrias e portas, aumentando assim a resistência térmica dos elementos revestidos. Com base no total encontrado na Tabela 23 é possível a obtenção dos valores de EI para a construção do modelo (B), acrescentando-se ao modelo (A) a lã de rocha, o gesso cartonado, a massa corrida e a tinta PVA. A EI necessária para a construção desse modelo tem um montante da ordem de 347,16 GJ. O acréscimo de energia nesse modelo é de 17,16 GJ. A Tabela 24 ilustra esses números.

Tabela 24 – EI nos elementos construtivos do modelo (B)

| Modelo B | | | |
|------------------------|--------|---------------------------------|---------------------|
| Elementos construtivos | Área | Total EI (MJ) m ² | Total de EI (MJ) |
| Lã de rocha | 115,85 | 73,04 | 8.461,68 |
| Gesso cartonado | 115,85 | 57,95 | 6.713,51 |
| Massa corrida | 115,85 | 2,80 | 324,38 |
| Tinta Latex PVA | 115,85 | 14,37 | 1.664,76 |
| Subtotal | | | 17.164,34 |
| Modelo A | | | 329.997,69 |
| Total | | | 347.162,03 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

4.2.3. Modelo (C) incorporação de lã de rocha nos tetos

Este modelo utiliza como base o modelo (B) e teve o acréscimo da lã de rocha com revestimento de gesso cartonado, emassamento com massa à base de PVA e pintura látex à base de PVA, na face interna dos tetos aumentando assim a resistência térmica dos elementos revestidos. Com base no total encontrado na Tabela 24 é possível a obtenção dos valores de EI para a construção do modelo (C), acrescentando-se ao modelo (B) a lã de rocha, o gesso cartonado, a massa corrida e a tinta PVA. A EI necessária para a construção dessa edificação é de 366,16 GJ. O acréscimo de energia nesse modelo é de 18,98 GJ. A Tabela 25 ilustra esses números.

Tabela 25 – EI nos elementos construtivos do modelo (C)

| Modelo C | | | |
|------------------------|--------|---------------------------------|---------------------|
| Elementos construtivos | Área | Total EI (MJ) m ² | Total de EI (MJ) |
| Lã de rocha | 128,11 | 73,04 | 9.357,15 |
| Gesso cartonado | 128,11 | 57,95 | 7.423,97 |
| Massa corrida | 128,11 | 2,80 | 358,71 |
| Tinta Latex PVA | 128,11 | 14,37 | 1.840,94 |
| Subtotal | | | 18.980,78 |
| Modelo B | | | 347.162,03 |
| Total | | | 366.142,80 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

4.2.4. Modelo (D) substituição das esquadrias externas por esquadrias com vidro duplo.

Este modelo utiliza como base o modelo (C) e teve a substituição das esquadrias externas por esquadrias de alumínio, similares às existentes utilizando-se

o vidro duplo com preenchimento de argônio entre as duas lâminas de vidro (MENZIES e WHERRETT, 2005).

A lã de rocha não soluciona todos os problemas, desse modo foi realizado um estudo da viabilidade energética da substituição das atuais esquadrias existentes por modelos mais eficientes conforme apontado pelos trabalhos de (COLLINS *et al.*, 1995; BALLINGER e LYONS, 1996; SEKHAR e LIM CHER TOON, 1998).

Com base no total encontrado na Tabela 26 é possível a obtenção dos valores de EI para a construção do modelo (D), substituindo-se as esquadrias de alumínio com vidro simples de 4 mm, por esquadrias de alumínio com vidro duplo e inserção de argônio entre os vidros.

A EI necessária para a construção dessa edificação é da ordem de 387,83 GJ. O acréscimo de energia nesse modelo é de 21,69 GJ. A Tabela 26 ilustra esses números.

| Tabela 26 – EI nos elementos construtivos do modelo (D) | | | |
|---|-------|------------------------------|------------------|
| Modelo D | | | |
| Elementos construtivos | Área | Total EI (MJ) m ² | Total de EI (MJ) |
| Janela alumínio vid duplo c/argônio | 11,40 | 4.151,00 | 47.321,40 |
| Janela vd comum | 11,40 | -2.248,00 | -25.627,20 |
| Subtotal | | | 21.694,20 |
| Modelo C | | | 366.142,80 |
| Total | | | 387.837,00 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

4.2.5. Resumo da EI dos modelos (A), (B), (C) e (D)

Cada um dos modelos estudados teve um resultado de EI devido ao acréscimo da lã de rocha, gesso cartonado, emassamento, pintura e a substituição das janelas. Esses dados e sua variação percentual podem ser vistos na Tabela 27.

O modelo (B) apresentou um incremento de 17,16 GJ sobre o modelo (A), correspondendo a 4,94%. O modelo (C) apresentou um incremento de 18,98 GJ sobre o modelo (B), correspondendo a 5,18% e acumulado de 10,13%. O modelo (D) apresentou um incremento de 21,69 GJ sobre o modelo (C), correspondendo a 5,59% e acumulado de 15,72%.

A Tabela 27 ilustra esses dados.

Tabela 27 - Resumo da EI para cada um dos modelos

| Resumo da EE embutida para cada um dos modelos | | | | |
|---|----------------------------------|------------|-----------------|-------------------------|
| Modelo | Total de EE (MJ) por elemento | Incremento | Incremento % | Incremento acumulado |
| A | 329.997,69 | 0,00 | 0,00% | 0,00% |
| B | 347.162,03 | 17.164,34 | 4,94% | 4,94% |
| C | 366.142,80 | 18.980,78 | 5,18% | 10,13% |
| D | 387.837,00 | 21.694,20 | 5,59% | 15,72% |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

Os dados da Tabela 27 indicam que para o modelo (A) a EI é de 330 GJ, de 347 GJ para o modelo (B), de 366 GJ para o Modelo (C) e de 388 GJ para o modelo (D). Esses valores representam um aumento percentual relativo de um modelo para o outro de 4,94%, 5,18% e 5,59% respectivamente. O aumento percentual acumulado é de 4,94%, 9,87% e 14,91%.

A Figura 21 ilustra esses percentuais.

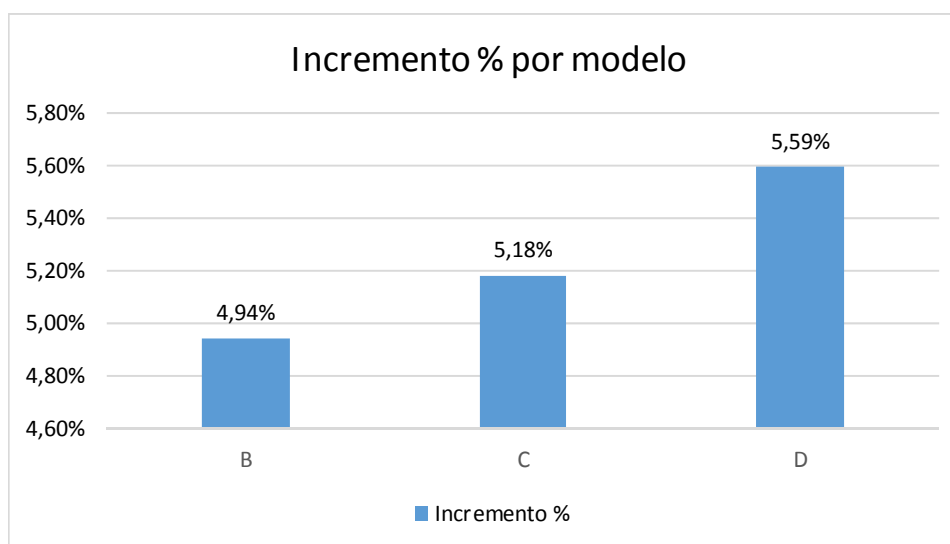


Figura 21 – Incremento % por modelo

Fonte: O autor.

4.3. QUANTIDADE DE ENERGIA OPERACIONAL EM CADA UM DOS MODELOS

Esse item trata da EO de cada um dos modelos necessária ao aquecimento da edificação. São apresentados a seguir os resultados obtidos.

Simulou-se a colocação desse isolante térmico nas paredes externas, ou seja, aquelas que compõem o envelope da edificação. Este é constituído por todas as superfícies que envolvem as zonas térmicas que formadas pelos ambientes. Essas superfícies são aquelas que têm contato com o ar exterior, conforme ilustrado no Quadro 4.

| Superfícies | Elementos construtivos | Descrição |
|-------------|------------------------|---|
| Laterais | Parede de 1 e ½ vez | Paredes mais espessuras usadas no perímetro da edificação |
| | Janelas | Vidro e alumínio em aberturas acima do peitoril |
| | Portas | Madeira em aberturas de passagem (sem peitoril) |
| Superiores | Laje de teto | Laje superior entre o sótão e os cômodos |
| | Cobertura | Telhas e estrutura acima da laje de forro |

Quadro 4 – Elementos que compõe o invólucro.

Fonte: O autor.

Estas superfícies foram obtidas utilizando os dados de Graf (2011) e estão ilustradas na Tabela 28.

Tabela 28 – Dados do envelope com valores-U

| Descrição | Área (m²) | Valor-U (W/(m²°C)) |
|------------|-----------|--------------------|
| Paredes | 115,85 | 1,940 |
| Paredes | 10,85 | 2,620 |
| Janelas | 11,40 | 5,750 |
| Portas | 4,83 | 3,100 |
| Teto | 128,11 | 2,890 |
| Cobertura | 132,63 | 4,460 |
| Gesso | 126,70 | 0,033 |
| Lã rocha | 126,70 | 0,034 |
| Esquadrias | 11,40 | 2,600 |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

A EO pode ser obtida a partir de uma extrapolação utilizando-se os dados de Graf (2011), montando-se a equação linear (6) para determinação desses valores.

$$Q = [(A_j U_j + A_p U_p + A_t U_t) \Delta T + Q_0] FC \quad (6)$$

Onde:

Q=consumo anual de energia;

A_j =área de janelas;

U_j =valor-U das janelas;

A_p = Área de paredes;

U_p =valor-U das paredes;

A_t =área de tetos;

U_t =valor-U dos tetos;

ΔT =diferença de temperatura representativa;

Q_0 = valor de EO (para área nula);

FC= constante, que não é um mero fator de conversão, uma vez que tem a dimensão “tempo”.

O trabalho de Graf (2011) deu origem aos valores para os modelos R1-N e

R2-N, cada qual com um diferente valor de transmitância térmica ponderada pelas áreas (soma de áreas vezes transmitâncias para paredes, janelas e teto) e o decorrente consumo anual de energia. Com base na equação (6), foi montado o sistema com as equações (7) e (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{R1-N} = [(A_{jR1-N} U_{jR1-N} + A_{pR1-N} U_{pR1-N} + A_{tR1-N} U_{tR1-N}) \Delta T + Q_0] FC \\ Q_{R2-N} = [(A_{jR2-N} U_{jR2-N} + A_{pR2-N} U_{pR2-N} + A_{tR2-N} U_{tR2-N}) \Delta T + Q_0] FC \end{array} \right\} \quad (7)$$

Esse sistema permite a obtenção das duas variáveis necessárias à equação (6) e da sensibilidade do consumo energético anual em relação à transmitância térmica do invólucro, dividida entre a parede, janelas e teto. Após isso pode-se estimar qual o efeito de se acrescentar lã de rocha nas paredes do envelope e no teto.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{R1-N} = [(115 \cdot 1,94 + 11,40 \cdot 5,75 + 130 \cdot 1,75) \Delta T + Q_0] FC \\ Q_{R2-N} = [(115 \cdot 1,16 + 11,40 \cdot 5,75 + 130 \cdot 1,75) \Delta T + Q_0] FC \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [(578,44 \cdot (\Delta T + Q_0))] FC = 2.460,68 \text{ W} \\ [(428,08 \cdot (\Delta T + Q_0))] FC = 1.669,62 \text{ W} \\ 90,36 \cdot \Delta T = 794,48 \text{ W} \end{array} \right\}$$

Esses dois parâmetros possibilitam a obtenção da equação de uma reta que permita a extrapolação, para dado conjunto de transmitâncias térmicas de paredes, janelas e teto, qual o consumo energético anual. Esta reta será aplicada para cada um dos modelos (A), (B) e (C) e (D)

Com base na equação (6) e nos dados da Tabela 29 foi possível calcular a energia necessária para a manutenção do ΔT de 8,7°C.

O trabalho desconsiderou a EO necessária para resfriar o modelo (A), pois por se situar na zona bioclimática 1 (ABNT, 2005), esse valor representa cerca de 10% do total de energia consumida para a residência (GRAF, H. F., 2011).

4.3.1. Modelo (A) edificação R1-N em sua condição original de construção

Foi identificado um consumo de 2,84 kW e EO anual da ordem de 89,80 GJ, necessária ao aquecimento da edificação, conforme ilustrado na Tabela 29.

Tabela 29 – EO do modelo (A)

| Modelo (A) | | | |
|-----------------------------|------|-----------|--------------------|
| Local / Material | | Área (m²) | Valor -U W/m²°C |
| Parede Externa e23 | (1) | 115,85 | 1,940 |
| Parede Externa e13 | (2) | 10,85 | 2,620 |
| Esq Al. com vidro simples | (3) | 11,4 | 5,750 |
| Porta Madeira | (4) | 4,83 | 3,100 |
| Teto + Cobertura (média) | (5) | 130,37 | 1,754 |
| $S (A_i * U_i)$ | (10) | 562,324 | W/°C |
| Q_0 | (11) | -2.086,73 | MJ |
| DT | (12) | 8,775 | °C |
| $(8760*3600/10+E06) = (FC)$ | (13) | 31,536 | Constante |
| $Q(A) = [(6)*(DT+Q_0)]$ | (14) | 2.848 | W |
| Energia modelo (13*14) | (15) | 89.804 | MJ/ano |

Fonte: O autor com base em (GRAF, H.F., 2011).

4.3.2. Modelo (B) com a incorporação de lã de vidro nas paredes externas

Foi identificado um consumo de 0,64 kW e EO anual da ordem de 20,32 GJ, necessária ao aquecimento da edificação, conforme ilustrado na Tabela 30.

A lã de rocha e o gesso cartonado estão indicados uma vez que fazem parte do modelo. Seus valores-U estão considerados nas superfícies de paredes.

Tabela 30 – EO do modelo (B)

| Modelo (B) | | | |
|-----------------------------|------|-----------|--------------------|
| Local / Material | | Área (m²) | Valor -U W/m²°C |
| Parede Externa e23 | (1) | 115,85 | 0,01660 |
| Parede Externa e13 | (2) | 10,85 | 0,01664 |
| Esq Al. com vidro simples | (3) | 11,40 | 5,75000 |
| Porta Madeira | (4) | 4,83 | 3,10000 |
| Teto + Cobertura (média) | (5) | 130,37 | 1,75366 |
| Gesso Cartonado | (6) | - | - |
| Lã rocha | (7) | - | - |
| $S (A_i * U_i)$ | (10) | 311,252 | W/°C |
| Q_0 | (11) | -2.086,73 | MJ |
| DT | (12) | 8,775 | °C |
| $(8760*3600/10+E06) = (FC)$ | (13) | 31,536 | Constante |
| $Q(B) = [(6)*(DT+Q_0)]$ | (14) | 645 | W |
| Energia modelo (13*14) | (15) | 20.325 | MJ/ano |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

4.3.3. Modelo (C) incorporação de lã de rocha nos tetos

Foi identificado um consumo de -1,34 kW e EO anual da ordem de -42,34 GJ, necessária ao aquecimento da edificação, conforme ilustrado na Tabela 31.

Tabela 31 – EO do modelo (C)

| Modelo (C) | | | |
|-----------------------------|------|------------------------|---------------------------------|
| Local / Material | | Área (m ²) | Valor -U W/m ² °C |
| Parede Externa e23 | (1) | 115,85 | 0,017 |
| Parede Externa e13 | (2) | 10,85 | 0,017 |
| Esq Al. com vidro simples | (3) | 11,4 | 5,750 |
| Porta Madeira | (4) | 4,83 | 3,100 |
| Teto + Cobertura (média) | (5) | 65,185 | 0,017 |
| Gesso Cartonado | (6) | - | - |
| Lã rocha | (7) | - | - |
| $S (A_i * U_i)$ | (10) | 84,790 | W/°C |
| Q_0 | (11) | -2.086,73 | MJ |
| DT | (12) | 8,775 | °C |
| $(8760*3600/10+E06) - (FC)$ | (13) | 31,536 | Constante |
| $Q(C) = [(6)*(DT+Q_0)]$ | (14) | -1.342,70 | W |
| Energia modelo (13*14) | (15) | -42.343 | MJ/ano |

Fonte: O autor com base em (GRAAF, 2011).

O acréscimo do material isolante aumenta a resistência térmica, reduzindo consequentemente o valor-U. Por se tratar de consumo de energia, não há que se falar em energia negativa. A característica do modelo de simulação fez com que o incremento do valor-U conduzisse a um valor menor do que zero, permitindo inferir-se que o ΔT pode ser maior do que 8,7°C.

A lã de rocha e o gesso cartonado estão indicados uma vez que fazem parte do modelo. Seus valores-U estão considerados nas superfícies de paredes e tetos.

4.3.4. Modelo (D) substituição das esquadrias externas por esquadrias com vidro duplo.

Com base no total encontrado na Tabela 31 é possível a obtenção dos valores de EO para a construção do modelo (D), substituindo-se as esquadrias de alumínio com vidro simples de 4 mm, por esquadrias de alumínio com vidro duplo e inserção de argônio entre os vidros.

Foi identificado um consumo de -1,65 kW e EO anual da ordem de -52,28 GJ, necessária ao aquecimento da edificação, conforme ilustrado na Tabela 32.

Tabela 32 – EO do modelo (D)

| Modelo (D) | | | |
|------------------------------|------|------------------------|---------------------------------|
| Local / Material | | Área (m ²) | Valor -U W/m ² °C |
| Parede Externa e23 | (1) | 115,85 | 0,017 |
| Parede Externa e13 | (2) | 10,85 | 0,017 |
| Esq Al. com vidro simples | (3) | 11,4 | - |
| Porta Madeira | (4) | 4,83 | 3,100 |
| Teto + Cobertura (média) | (5) | 32,5925 | 0,017 |
| Gesso Cartonado | (6) | - | - |
| Lã rocha | (7) | - | - |
| Esquadrias Al Vidro duplo AR | (8) | 11,4 | 2,600 |
| $S (A_i * U_i)$ | (10) | 48,880 | W/°C |
| Q_0 | (11) | -2.086,73 | MJ |
| DT | (12) | 8,775 | °C |
| $(8760*3600/10+E06) - (FC)$ | (13) | 31,536 | Constante |
| $Q(C) = [(6)*(DT+Q_0)]$ | (14) | -1.657,81 | W |
| Energia modelo (13*14) | (15) | -52.281 | MJ/ano |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

A característica do modelo de simulação fez com que o incremento do valor-U conduzisse a um valor menor do que zero, permitindo inferir-se que o ΔT pode ser maior do que 8,7°C.

A lã de rocha e o gesso cartonado estão indicados uma vez que fazem parte do modelo. Seus valores-U estão considerados nas superfícies de paredes e tetos.

4.3.5. Resumo da EO dos modelos (A), (B), (C) e (D)

Cada um dos modelos estudados teve um resultado de EO devido ao acréscimo da lã de rocha, gesso cartonado e a substituição das janelas.

O modelo (A) tem um consumo anual de EO de 89,80 GJ. O modelo (B) tem um consumo anual de 20,32 GJ correspondente a uma redução de 77,37%. O modelo (C) apresentou consumo anual de (-) 42,34 GJ e o modelo (D) (-) 52,28 GJ. O resultado negativo dos dois últimos modelos é uma característica do modelo matemático utilizado não implicando em consumo negativo de energia. A Tabela 33 ilustra esses dados.

Tabela 33 - Resumo da EO para cada um dos modelos

| Modelo | Energia W | Total de EI MJ/ano | Decréscimo MJ/ano | Decréscimo % |
|--------|-----------|-----------------------|----------------------|--------------|
| A | 2.848 | 89.804 | 0 | 0,00% |
| B | 645 | 20.325 | 69.479 | 77,37% |
| C | -1.343 | -42.343 | - | - |
| D | -1.658 | -52.281 | - | - |

Fonte: O autor com base em (GRAF, 2011).

4.4. COMPARATIVO ENTRE EI NOS EUA E NO BRASIL

Os dados levantados no relatório da NAIMA (PE AMERICAS, 2010; 2013) e obtidos da Rockfibras (MOTTA, 2013a) permitem inferir que o consumo de EI para a produção de 1m² de placa de lã de rocha nos Estados Unidos é de 47,58 MJ, sendo 44,59 MJ de energia não renovável e 2,99 MJ de energia renovável. O consumo de lã de EI para a produção de 1m² de placa lã de rocha no Brasil é de 48,59 MJ, sendo 45,90 MJ de energia renovável e 2,79 MJ de energia renovável. A diferença encontrada de 1,01 MJ é pequena e em função da variabilidade na obtenção dos dados foi considerada nula. O que difere um processo do outro é a origem de energia conforme ilustrado na Figura 22.

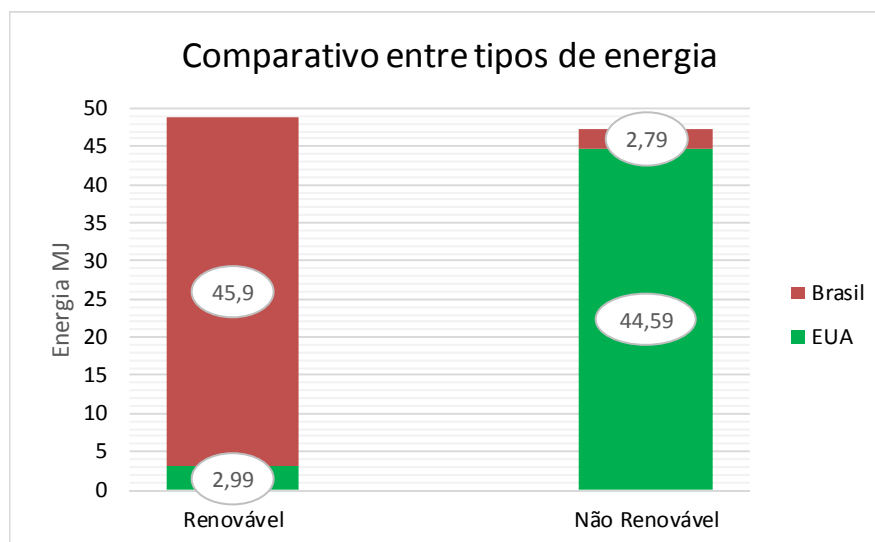


Figura 22 – Comparativo entre os tipos de energia
Fonte: O autor.

4.5. CONSUMO DE ENERGIA DOS QUATRO MODELOS

A Figura 23 ilustra o decréscimo da energia necessária à manutenção do ΔT de 8,7°C, de acordo com o modelo utilizado nas equações (7) e (8). O acréscimo do material isolante aumenta a resistência térmica, reduzindo consequentemente o

valor-U. Por se tratar de consumo de energia, não há que se falar em energia negativa. A característica do modelo de simulação fez com que o incremento do valor-U conduzisse a um valor menor do que zero, permitindo inferir-se que a amplitude de temperatura pode ser maior.

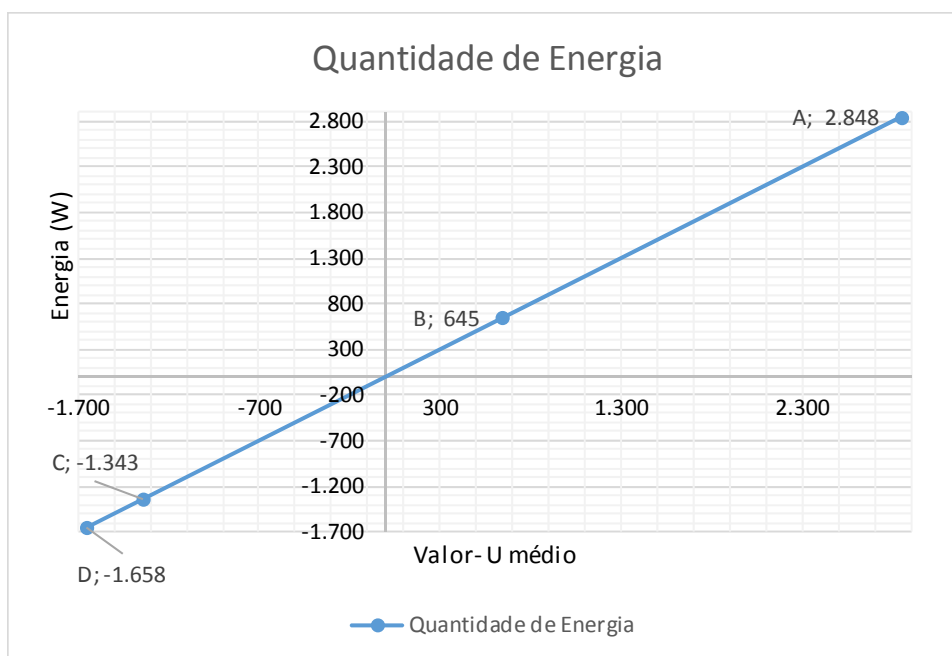


Figura 23 – Quantidade de energia necessária à manutenção do diferencial de temperatura
Fonte: O autor.

4.5.1. Resumo da EI e EO dos modelos (A), (B), (C) e (D)

O cálculo dos modelos (A), (B), (C) e (D) pode ser visto no item 4.2.5 e 4.3.5. Na Tabela 34 está ilustrada a EI dos quatro modelos, o acréscimo de EO nos modelos (B), (C) e (D). Demonstra-se também o consumo de EO do modelo (A) e (B), uma vez que os modelos (C) e (D) por apresentarem valores negativos no modelo matemático utilizado conforme ilustrado na Tabela 33, não foram considerados. A Economia de EO foi demonstrada para os modelos (B) e (C). O modelo (D) não foi calculado tendo em vista que o valor do consumo apontado pelo modelo é negativo.

Tabela 34 - Resumo da EI e EO para cada um dos modelos

| Modelo | EI MJ | Acréscimo de EI MJ | Consumo EO | | Economia EO MJ | |
|--------|---------|--------------------|------------|------------|----------------|-----------|
| | | | MJ/ano | MJ/50 anos | 1 ano | 50 anos |
| A | 329.998 | | 89.804 | 4.490.200 | | |
| B | 347.162 | 17.164 | 20.325 | 1.016.250 | 69.479 | 3.473.950 |
| C | 366.143 | 18.981 | - | - | 89.804 | 4.490.200 |
| D | 387.837 | 21.694 | | | - | |

Fonte: O autor.

4.6. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AO LONGO DO CICLO DE VIDA

Os modelos (A), (B), (C) e (D) fornecem o consumo anual de EI. A projeção dos valores ao longo do ciclo de vida da edificação de 50 anos produziu os seguintes dados.

O modelo (A) tem EI de 329,99 GJ com EO de 89,80 GJ/ano, perfazendo uma EO total de 4.49 TJ após os 50 anos.

O modelo (B) tem EI de 347,16 GJ, o que representa um acréscimo de 17,17 GJ sobre o modelo (A) e EO de 20,32 GJ/ano, perfazendo uma EO total de 1,01 TJ e uma economia de 69,47 GJ por ano e 3,47 TJ ao final do ciclo de vida.

O modelo (C) tem EI de 366,14 GJ, o que representa um acréscimo de 18,98 GJ sobre o modelo (B), perfazendo uma economia de 89,80 GJ por ano e 4,49 TJ ao final do ciclo de vida.

O modelo (D) tem EI de 387,83 GJ o que representa um acréscimo de 21,69 GJ.

Os dois últimos modelos por apresentarem um valor negativo de EO consumida, superam a necessidade da habitação e não tiveram a EO ao longo do ciclo de vida calculada.

4.7. TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO

Considerando-se os dados da Tabela 27 e da Tabela 33 é possível calcular o tempo de retorno energéticos dos modelos (B), (C) e (D) em relação ao modelo (A).

O tempo de retorno energético pode ser observado através do cruzamento das linhas dos gráficos dos quatro modelos conforme ilustrado na Figura 24.

A Figura 24 ilustra que o tempo de retorno energético do modelo (B) é de aproximadamente três meses, do modelo (C) é de aproximadamente cinco meses e do modelo (D) é de aproximadamente oito meses. Considerando que o tempo de retorno energético dos modelos (B), (C) e (D) é inferior a um ano justifica-se a utilização do isolamento para um ciclo de vida de 50 anos uma vez que ter-se-ia os restantes 49 anos sem esse custo energético.

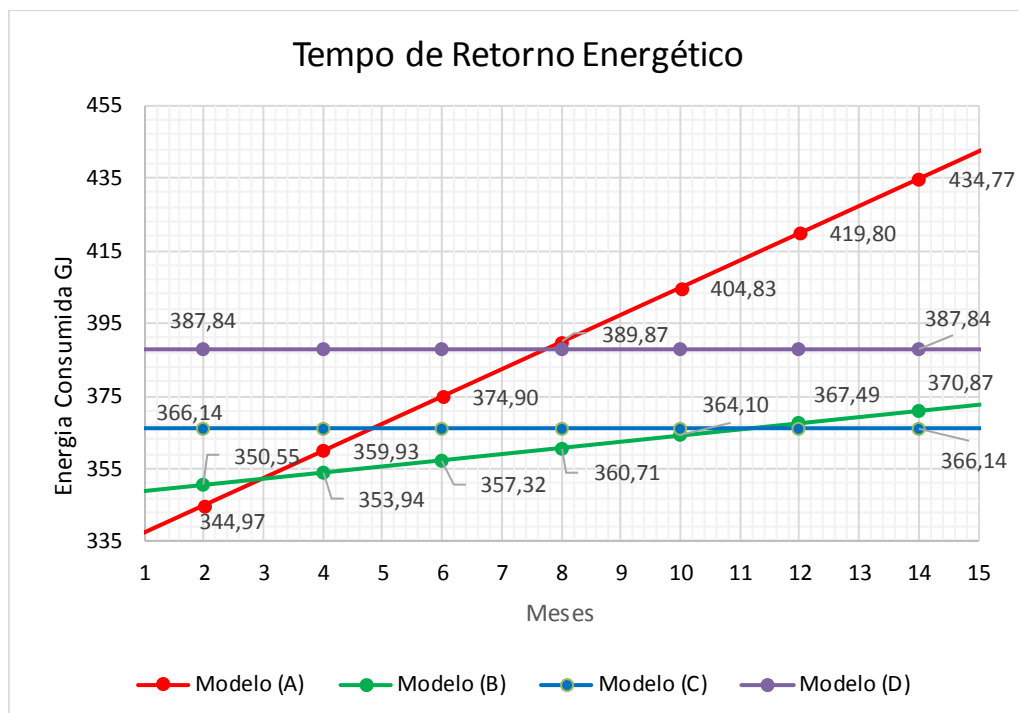


Figura 24 – Quantidade de energia
Fonte: O autor.

5. CONCLUSÃO

O estudo traz uma contribuição para as pesquisas sobre eficiência energética em edificações destacando a implantação de isolamento térmico em paredes e tetos como uma das formas de melhoria dessa eficiência. As simulações desenvolvidas sobre EI no modelo estudado permitem fazer algumas ponderações.

A residência tomada como padrão para o estudo replica um modelo arquitetônico utilizado em Curitiba – PR, que pertence à zona bioclimática 1. Este modelo apresenta diversos problemas de conforto térmico uma vez que suas características térmicas não atendem às necessidades dos usuários.

O estudo demonstrou que a aplicação da lã de rocha é viável para redução da energia de operação relativa ao aquecimento, sendo o *payback* da EI nos modelos (B), (C) e (D), inferior a um ano, tendo-se assim uma economia de energia até o final do ciclo de vida da edificação.

À luz dos dados coletados na pesquisa, pode-se inferir os seguintes aspectos gerais:

A análise hierárquica demonstrou a viabilidade econômica, ambiental e de segurança, entre outras, da escolha da lã de rocha como material isolante térmico para o estudo.

O trabalho desconsiderou a EO necessária para resfriar a casa modelo, em função da mesma se situar na zona bioclimática 1, visto que esse valor representa cerca de dez por cento do total de energia consumida para a residência.

Um outro aspecto considerado é o que se refere aos tipos de energia utilizada. Os estudos demonstram que a EI para produção da lã de rocha no Brasil é similar àquela dispendida nos EUA. Todavia a matriz energética brasileira é em sua quase totalidade oriunda de fontes renováveis ao contrário da matriz americana que tem sua base em energia não renovável.

5.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando o prosseguimento das investigações sobre a aplicação de isolamentos térmicos em edificações colocam-se as seguintes sugestões:

- Investigar a EI da lã de rocha de outras fontes produtoras no Brasil;
- Investigar a EI da lã de vidro;
- Investigar a EI dos demais materiais isolantes térmicos citados no

trabalho;

- Desenvolver novos modelos de aplicação da lã de rocha em edificações de outras zonas bioclimáticas,
- Desenvolver novos modelos de aplicação dos isolantes térmicos nas demais zonas bioclimáticas do Brasil;
- Desenvolver projetos e metodologia para aplicação de lã de rocha nas novas edificações;
- Desenvolver projetos e metodologia para aplicação de lã de rocha nas edificações existentes – *retrofit*.
- Investigar os valores necessários para a aplicação de lã de rocha na edificação e compará-los com a economia no dispêndio de energia elétrica de manutenção;
- Investigar a economia de energia de aquecimento e refrigeração no modelo estudados e em outros modelos quantificando-os financeiramente.

REFERÊNCIAS

ABDOU, A. A.; BUDAIWI, I. M. Comparison of Thermal Conductivity Measurements of Building Insulation Materials under Various Operating Temperatures. **Journal of Building Physics**, v. 29, n. 2, p. 171-184, 2005. Disponível em: < <http://jen.sagepub.com/content/29/2/171.abstract> >.

ABNT. **NBR 15220 : Desempenho Térmico Edificações**,. Rio de Janeiro Associação Brasileira de Normas Técnicas 2005.

_____. **NBR 12721: Avaliação de custos unitários e preparo de orçamento de construção para incorporação de edifícios em condomínio – Procedimento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2006.

ADALBERTH, K. **Energy use during the life cycle of buildings: a method**. Building and Environment. 32: 321-329 p. 1997.

AHMAD, M. et al. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 6, p. 673-681, 2006. ISSN 03787788.

AL-AJLAN, S. A. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 17-18, p. 2184-2191, 2006. ISSN 13594311.

AL-HOMOUD, M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 353-366, Mai 2004 2005. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304001878> >.

AL-SANEA, S. A.; ZEDAN, M. F. **Optimum insulation thickness for building walls in a hot-dry climate**. International Journal of Ambient Energy. 22: 115-126 p. 2002.

ARCELOR MITTAL. Desempenho térmico de coberturas. São Paulo, 2003. Disponível em: < http://www.perfilor.com.br/texto_03.php >. Acesso em: Mar.

ARCHTOOLBOX. R-values of Insulation and Other Building Materials. Boston - MA - USA, 2014. Disponível em: < <http://archtoolbox.com/materials-systems/thermal-moisture-protection/24-r-values.html> >. Acesso em: Abr.

ARQUITETURA SUSTENTÁVEL. 10 modelos de habitações antigas que eram

construídas apenas com recursos locais. 2014. Disponível em: < <http://arquiteturasustentavel.org/15-casas-ancias-que-eram-construidas-apenas-com-recursos-naturais/> >. Acesso em: Fev.

BALLINGER, J. A.; LYONS, P. R. Advanced glazing technology for Australia - research and application. **Renewable Energy**, v. 8, n. 1-4, p. 61-65, 1996. ISSN 0960-1481. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196888215> >. Acesso em: 1996/8//.

BARR, R. **China Surpasses US as top energy consumer**. Oil & Energy. NBC News.com: AP - Associated Press 2012.

BISESI, P. J.; PURCELL, D.; MARION, M. **DESIGNING FOR HUMAN COMFORT AND ENERGY EFFICIENCY**. Engineering Manual -. Black Mountain - NC: 19 p. 2007.

BITARAFAN, M. et al. Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 12, n. 3, p. 360-367, 2012. ISSN 1644-9665. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1644966512000726> >.

BLACK, C.; OOTEGHEM, K. V.; BOAKE, T., M. Carbon neutral steel building systems research project – a case study investigating the relationship of operational energy and embodied energy in achieving a holistic carbon neutral retail building. Proceedings of american solar energy society, national solar conference, 2010, Phoenix, Arizona, USA.

BOLATTÜRK, A. **Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey**. Applied Thermal Engineering: 1301-1309 p. 2006.

BOLATTÜRK, A. **Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey**. Building and Environment. 43: 1055-64 p. 2008.

BOZSAKY, D. The historical development of thermal insulation materials. **Periodica polytechnica**, v. 41, n. 2, p. 1-8, 2010. Disponível em: < <http://www.pp.bme.hu/ar> >.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2013: Ano Base 2012**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p.284. 2013

BRENAN, J. U-Values. **Sustainability Hub**, 2006. Acesso em: Abr.

BRUNDTLAND, G. H. **Rockwool insulation products are probably the most sustainable solution.** 2010

BUCHANAN, A.; HONEY, B. **Energy and carbon dioxide implications of building construction.** *Energy and Buildings*: Elsevier Science. 20: 205-217 p. 1994.

BUDAIWI, I.; ABDOU, A. The impact of thermal conductivity change of moist fibrous insulation on energy performance of buildings under hot-humid conditions. **Energy and Buildings**, v. 60, n. 0, p. 388-399, 2013. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813000662> >.

BUDDHIMA, I.; ABDOU, A.; AL-HOMOUD, M. S. Variations of Thermal Conductivity of Insulation Materials Variations of Thermal Conductivity of Insulation Materials Variations of Thermal Conductivity of Insulation Materials. **Journal of Architectural Engineering**, v. 8, n. 4, 2002.

BYNUM, R. T.; BYNUM, R. A Brief History of Thermal Insulation 2000. Disponível em: < <http://ebookbrowse.com/a-brief-history-of-thermal-insulation-pdf-d460071332> >. Acesso em: Feb.

CABEZA, L. F. et al. Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 5, p. 630-636, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002825> >.

CHANKONG, Y.; HAIMEES, Y. **Multiobjective Decision Making.** Amsterdam: North Holland, 1983.

CHAPMAN, T. U-Values from Domestic Heating Design Guide v1.0. **Domestic Heating**, 2012. Disponível em: < [http://www.samsung-heatpumps.co.uk/documents/U-Values from Domestic Heating Design Guide v1.0.pdf](http://www.samsung-heatpumps.co.uk/documents/U-Values%20from%20Domestic%20Heating%20Design%20Guide%20v1.0.pdf) >.

CHENG, A.; LIN, W.-T.; HUANG, R. Application of rock wool waste in cement-based composites. **Materials & Design**, v. 32, n. 2, p. 636-642, 2011. ISSN 0261-3069. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306910004899> >.

CHOU, J.; PHAM, A.; WANG, H. Bidding strategy to support decision-making by integrating fuzzy AHP and regression-based simulation. **Automation in Construction**, n. 0, 2013. ISSN 0926-5805. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580513001040> >.

CHU, A. T. W.; KALABA, R. E.; SPINGARN, K. A comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets. **Journal of Optimization Theory and Applications**, v. 27, n. 4, p. 531-538, 1979/04/01 1979. ISSN 0022-3239. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF00933438> >.

CLOSE, P. D. **Thermal Insulation of Buildings**. New York: Reinhold, 1947.

COLE, R. J. **Energy and greenhouse gas emissions associated with the construction of alternative structural systems**. Building and Environment. 23: 224-237 p. 1999.

COLLINS, R. E. et al. Vacuum glazing—A new component for insulating windows. **Building and Environment**, v. 30, n. 4, p. 459-492, 1995. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132395000252> >.

CROWTHER, P. Designfordisassemblytorecoverembodiedenergy. Design for disassembly to recover embodied energy, 1999, Melbourne—Brisbane—Cairns, Australia;.

DIVERSIFOAM PRODUCTS. What Is Extruded Polystyrene Insulation (XEPS)? , 2013. Disponível em: < <http://www.diversifoam.com/xeps.htm> >. Acesso em: Jan.

DIXIT, M. K. et al. Identification of parameters for embodied energy measurement: a literature review. . **Energy and Buildings** v. 42, n. 8, p. 1238–1238, 2010.

DIXIT, M. K. et al. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3730-3743, 2012. ISSN 13640321.

ECOFYS. **The Contribution of Mineral Wool and other Thermal Insulation Materials to Energy Saving and Climate Protection in Europe**. Cologne - Germany, p.1-36. 2002

EDSCO. HMIS Hazardous Materials Identification System 2002. Disponível em: < <http://www.liquidicecoolant.com/images/HMIS%20Hazardous%20Materials%20Identification%20System.pdf> >. Acesso em: Mai.

EIA. **Energy consumption expenditures, and emissions indicators, 1949–2004.** 2006

_____. Residential Energy Consumption Survey (RECS). Washington, v. 2013, 2011. Disponível em: < <http://www.eia.gov/consumption/residential/reports/2009/overview.cfm> >.

_____. **Annual Energy Review 2011.** Washington: Set 2012, p.390. 2012

_____. Electricity in the United States. **Electricity Explained**, Washington, 2013. Disponível em: < <http://www.eia.gov/electricity/> >. Acesso em: Dez.

EURIMA. U-values in Europe. Bruxelas - Belgium, 2011. Disponível em: < <http://www.eurima.org/u-values-in-europe/> >. Acesso em: Jan.

FARLEX. The Free Dictionary. p. HMIS - SIMP, 2002. Disponível em: < <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Hazardous+Materials+Identification+System> >. Acesso em: Jun.

FAY, M. R. **Comparative life cycle energy studies of typical Australian suburban dwellings.** PhD. Thesis. Faculty of Architecture, Building and Planning. The University of Melbourne. Melbourne - AU 1999.

FAY, R.; TRELOAR, G.; IYER-RANIGA, U. **Life-cycle energy analysis of buildings: a case.** Building Research and Information. Routledge - UK. 28: 41-41 p. 2000.

FERNANDEZ, P. N. **The influence of construction materials on life-cycle energy use and carbon dioxide emissions of medium size commercial buildings** 2008. 154 (Master). School of Architecture, Victoria University of Wellington

FREY, P. Building Reuse: Finding a Place on American Climate Policy Agendas **National Trust for Historic Preservation**, p. 39, 2008.

GOMEZ-RUIZ, J. A.; KARANIK, M.; PELÁEZ, J. I. Estimation of missing judgments in AHP pairwise matrices using a neural network-based model. **Applied Mathematics and Computation**, v. 216, n. 10, p. 2959-2975, 2010. ISSN 00963003.

GONZÁLEZ, M. J.; GARCÍA, N. J. Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. **Building and Environment**, v. 41, n. 7, p. 902-909, 2006. ISSN 0360-1323. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230500140X> >.

GRAF, H. F. **Transmitância térmica & energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR 12721**. 2011. 158 (Master). PPGCC - Programa de Pós Graduação em Construção Civil - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GRAF, H. F. **Transmitância térmica & energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR 12721**. Dissertação de Mestrado - PPGCC - Programa de Pós Graduação em Construção Civil - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba 2011.

GRODAN. Rockwool as a Growing Substrate for Hydroponic Systems. Roerdmond - The Netherlands 2004. Disponível em: < <http://grodan101.com/knowledge-center/rockwool-growing-substrate-hydroponic-systems> >. Acesso em: Dez.

HASAN, A. Optimum insulation-thickness for buildings using life-cycle cost. **Applied Energy**, p. 115-124, 1999.

HAYNES, R. Embodied Energy Calculations within Life Cycle Analysis of Residential Buildings. www.etoool.net.au, 2010. Disponível em: < <http://www.etoool.net.au/upload/PDFs/Embodied%20Energy%20Paper%20-%20Richard%20Haynes%205.pdf> >. Acesso em: Jun.

HEGNER, S. **Embodied Energy for Energy Efficiency Measures**. 2007. 84 (Masters). Department of Environmental Science, ETH Zurich, Zurich.

HOLTZHAUSEN, H. J. **Embodied energy and its impact on architectural decisions**. WIT Transactions on Ecology and the Environment: 377-385 p. 2007.

HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 837-848, 2008. ISSN 03787788.

IFIB, I. F. I. B. **Baustoffdaten – Ökoinventare ; M. Holliger, Holliger Energie Bern**: . Universität Karlsruhe. . Karlsruhe / Weimar / Zürich. 1995

ILCD. **INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM**. Luxembourg: European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environmental and Sustainability., 2010.

ISO. **Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines**. Geneva - SWITZERLAND: ISO. ISO 14044:2006 46 p. 2006.

JELLE, B. P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2549-2563, 2011. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002295> >.

JOHNSON, C. R.; BEINE, W. B.; WANG, T. J. Right-left asymmetry in an eigenvector ranking procedure. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 19, n. 1, p. 61-64, 2 1979. ISSN 0022-2496. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022249679900051> >.

JOHNSTON, R.; GOGSTAD, P.; WOOLCOCK, J. **Benchmarking and Specification of Sustainable Building Products**. UAE. 2008

KHEDARI, J.; NANKONGNAB, S.; FOTIOS, S. Agricultural waste materials as thermal insulation for dwellings in Thailand: preliminary results. PLEA 2008: 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, 2008, Dulin - Ireland. p.22-24.

KORJENIC, A. et al. Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2518-2523, 2011. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002611> >.

KOSKELA, L. **Application of the New Production Philosophy to Construction**. Stanford University. California:StanfordUniversity;. 1992

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

LEONARDI, M. **Cotação de preço recebida por <ricardohabib@gmail.com> em 24 abril 2014**. Isar - Isolamentos Térmicos e Acústicos. São Paulo - SP - Brasil. 2014

LINDMAIER, P. **Erarbeitung eines gesamthaften und leistbaren bauphysikalischen Konzeptes für die Gegebenheiten in Curitiba, Brasilien im Vergleich zu Wien mit entsprechender Kosten-Nutzen-Analyse im Rahmen einer realistischen Anpassung des thermischen Komforts**. 2013. 101 (Diplom-Ingenieur für technisch-wissenschaftliche Berufe). Masterstudiengang Bautechnische Abwicklung internationaler Großprojekte, der FH Campus Wien, Wien - Austria.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metr p les – o exemplo de S o Paulo**. S o Paulo: Hucitec, 1985.

LUSTI, M. **Data Warehousing und Data Mining**. 2nd. Berlin: Springer-Verlag, 2002.

MAEDA, H. H.; MATOSKI, A.; MEDEIROS, M. H. **Sele  o de residência pelo método da an lise hier rquica**. I CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Ponta Grossa, PR 2011.

MATTANA, A. J. et al. Análise hierárquica para escolha entre agregado natural e areia de britagem de rocha para confecção de argamassas de revestimento. **Ambiente Constr ido**, v. 12, n. 4, p. 63-79, 2012.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Envelope insulation and heat balance in commercial buildings. Eleventh International IBPSA Conference, 2009. p.7-30.

MENDONÇA. <**Habitar Sob Uma Segunda Pele.pdf**>. 2005. 1-569 (458) Doutorado Universidade do Minho, Guimarães - Portugal.

MENDONÇA, P. J. F. A. U. **Habitar Sob Uma Segunda Pele**. 2005. 569 (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães - Portugal.

MENZIES, G. F.; TURAN, S.; BANFILL, P. F. G. Life-Cycle Assessment and Embodied Energy: A Review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2007. p.135–143.

MENZIES, G. F.; WHERRETT, J. R. Multiglazed windows: potential for savings in energy, emissions and cost. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, n. 3, p. 249-258, August 1, 2005 2005. Disponível em: <<http://bse.sagepub.com/content/26/3/249.abstract>>.

MOTTA, F. **Entrevista concedida quando da visita   Indústria Rockfibras - Guararema - SP**. HABIB, R. 2013a.

_____. **Fábrica de Guararema - SP**. HABIB, R. 2013b.

NAIMA. **Insulating Your Home: Save Energy and Money**. Better Homes and Gardens: Naima: 1 p. 1995.

NEBEL, B.; ALCORN, A.; WITTSTOCK, B. **Life cycle assessment: adopting and adapting overseas LCA data and methodologies for building materials in New**

Zealand Ministry of Agriculture and Forestry New Zealand. 2008

PACKAGING, E.-I. A. What is EPS? , 1999. Disponível em: < http://www.epspackaging.org/index.php?option=com_content&view=article&id=24&Itemid=23 >. Acesso em: Jan.

PAPADOPOULOS, A. M. State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 1, p. 77-86, 2005. ISSN 03787788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804001641> >.

PAPADOPOULOS, A. M.; GIAMA, E. **Design and Development of Innovative Stone-wool Products for the Energy Upgrading and New Buildings**. Thessaloniki, Greek. 2004

_____. Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building. **Building and Environment**, v. 42, n. 5, p. 2178-2187, 2007. ISSN 0360-1323. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306001120> >.

PE AMERICAS. **Life Cycle Assessment of Mineral Wool Insulation Products**. Colorado - US p.58. 2010

_____. **Life Cycle Assessment of Mineral Wool Insulation Products**. Colorado - US p.58. 2013

PEARS, A. **Practical and policy issues in analysis of embodied energy and its application**.

. Proceeding of the embodied energy: the current state of play seminar 1996.

PEAVY, B. A. **A heat transfer note on temperature dependent thermal conductivity**. Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. 20: 76-90 p. 1996.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F.; LEVY, S. M. Durabilidade de concretos com agregados reciclados: uma aplicação de análise hierárquica. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 3, p. 125-134, 2012.

PERELLES, D. H.; MEDEIROS, M. H. F.; GARCEZ, M. R. Aplicação de análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço com polímeros reforçados com fibras. **Revista Alconpat**, v. 3, n. 3, p. 165-180, 2013.

PLANK, R. The principles of sustainable construction. **The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering**, v. 1, n. 4, p. 301-7, 2008.

PULLEN, S. **Data Quality of embodied energy methods**. Proceedings of embodied energy seminar: current state of play 1996.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001696> >.

RAYNOLDS, M.; FRASER, R.; CHECKEL, D. The relative mass-energy-economic (RMEE) method for system boundary selection. **International Journal of Life Cycle Assessment** v. 5, n. 1, p. 37-46, 2000.

REZA, B.; SADIQ, R.; HEWAGE, K. Sustainability assessment of flooring systems in the city of Tehran: An AHP-based life cycle analysis. (Analytical hierarchy process) (Report). **Construction and Building Materials**, Apr 2011 2011.

RISTINEN, R. A.; KRAUSHAAR, J. P. **Energy and the Environment**. Wiley, 2006. ISBN ISBN : 978-0-471-73989-0.

ROCKFIBRAS. **Fábrica de Boituva - SP** 2012a.

_____. **Fábrica de Guararema - SP** 2012b.

_____. Produtos - Lã de Rocha. Guararema, 2014. Disponível em: <
http://www.rockfibras.com.br/produtos_la_de_rocha.html >. Acesso em: Jan 2014.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1990a.

_____. How to make a decision: The Analytic Hierarchy process. **European Journal of Operation Research**, v. 48, p. 9-26, 1990b.

_____. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo - SP: 1991.

SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process: Decision**

Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. Pittsburgh - US: RWS Publications, 2005

SAMOJEDEN, L. L. **Instrumentação para o ensino de astronomia.** Curitiba - PR: UFPR 2013.

SANTOS, M., Ed. **A Urbanização Brasileira.** São Paulo - SP: Huciteced. 1994.

SARLOS, G.; DAURIAT, A. Energy, a challenge for humanity in the 21st century. Conference on Energy and the Environment, 2003, Shanghai - China. p.1-5.

SARTORI, I.; HESTNES, A. G. **Energy use in the life cycle of conventional and low-energy building: a review article.** Energy and Buildings. 39: 49–257 p. 2007.

SCHEUER, C. E. A. **Life cycle energy and environmental performance of a new university building modelling challenges and design implications.** Energy and Buildings: Elsevier Science Ltd. 35: 1049-1064 p. 2003.

SEKHAR, S. C.; LIM CHER TOON, K. On the study of energy performance and life cycle cost of smart window. **Energy and Buildings**, v. 28, n. 3, p. 307-316, 1998. ISSN 0378-7788. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778898000267>>.

SIG TECHNICAL INSULATION. **Part L Solutions. U-values tables.** SIGPLC. UK. 2006

SILVA, D. A. L. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO PAINEL DE MADEIRA MDP NO BRASIL.** 2012. 207 (Mestre). Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia da Universidade de São Paulo, USP, São Carlos.

SILVA, R. A. **Cotação de preço recebida por <ricardohabib@gmail.com> em 25 abril 2014.** CELPROM. Curitiba - PR - Brasil. 2014

SINDUSCON-MG. **Custo Unitário Básico (CUB/m²):.** Belo Horizonte: Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais, 2007.

SLESSER, M. M. **Energy in the Economy.** 2nd. London - UK: Macmillan, 1978.

_____. **Dictionary of Energy.** 2nd. London - UK: Macmillan, 1988.

SPENCE, R.; MULLIGAN, H. Sustainable development and the construction industry. **Habitat International**, p. 279-292, 1995. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0197397594000719> >.

TAVARES, S. F. Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras. **Tese de Doutorado**, p. 225, 2006.

TAVARES, S. F.; LAMBERTS, R. Estudos comparativos sobre consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais do Brasil, Austrália e Suécia. Anais do X Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído – ENTAC, 2004.

_____. Consumo de Energia para Construção, Operação e Manutenção das Edificações Residenciais no Brasil. ENCAC - ELACAC, 2005, Maceió.

THE DIRT. Energy. 2011. Disponível em: < <http://www.thedirt.org/book/export/html/5276> >. Acesso em: Nov.

THE ESSENTIAL CHEMICAL INDUSTRY. Polyurethanes. 2013. Disponível em: < <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyurethane.html> >. Acesso em: Jan.

THÉRÉZIAN, M. **Functional Unit** 2003.

THORMARK, C. **A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential**. Building and Environment: Elsevier Science. 37: 429-435 p. 2002.

TIMPEX. Glass Wool. 2013. Disponível em: < <http://www.tlimpex.com/glasswool.html> >. Acesso em: Jan.

TIWARI, N. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Identify Performance Scenarios for Enterprise Applications. **CMG - Computer Measurement Group**, Tunersville - USA, n. 4.03, 2009. Disponível em: < http://www.cmg.org/measureit/issues/mit29/m_29_1.html >.

TOMLOW, J. Bauphysik und die technische Literatur des Neuen Bauens S. **Bauphysik**, v. 29, n. 2, p. 146-158, 2007.

TRELOAR, G. et al. Building materials selection: greenhouse strategies for built

facilities. **Facilities**, v. 19, n. 3/4, p. 139/149, 2001.

TUMMALA, V. M. R.; LING, H. A Note on the Computation of the Mean Random Consistency Index of the Analytic Hierarchy Process (Ahp). **Theory and Decision**, v. 44, n. 3, p. 221-230, 1998.

U.S. **Alternatives for Estimating Energy Consumption - Appendix F**. Energy Information Administration, p.6. 2011

UNCTAD. The future energy matrix and renewable energy: implications for energy and food security In: DEVELOPMENT, U. N. C. O. T. A., Trade and Development Commission Multi-year Expert Meeting on Commodities and Development, 2010, Geneva. 24-25 Mar 2010. p.18.

UPTON, B. et al. The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008. ISSN 09619534.

VAN GOOL, W. Thermodynamic Aspects of Energy conservation. **Energy**, v. 5, p. 783–792., 1980.

VENKATARAMA, R. B. V.; JAGADISH, K. S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 2, p. 129-137, 2003. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801001414> >.

WD RE-THINKING LTD. **PassivHaus**. 2010

WIKIPEDIA. Óleo Combustível. Jul 2013 2013. Disponível em: < http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%93leo_combust%C3%ADvel >. Acesso em: Out.

_____. Zero-Energy Building. 2014. Disponível em: < http://en.wikipedia.org/wiki/Zero-energy_building >. Acesso em: Jan.

WINTHER, B. N.; HESTNES. **Solar versus green: the analysis of a norwegian row house**. *Solar Energy*. 66: 387-393 p. 1999.

WORD INFO. English Word Information. **exa**, 1999. Acesso em: Jan.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: 2005.

YU, J. et al. **A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China.** Applied Energy. 86: 2590-2599 p. 2009.

ZHANG, B. M.; ZHAO, S. Y.; HE, X. D. Experimental and theoretical studies on high-temperature thermal properties of fibrous insulation. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 109, n. 7, p. 1309-1324, 5 2008. ISSN 0022-4073. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407307003007> >.

ANEXOS















































ANEXO 1 - HMIS Exemplo de rótulo

HMIS Label Example

| | |
|---|------------|
| HMIS® | |
| Chemical Name | |
| HEALTH | * 2 |
| FLAMMABILITY | 1 |
| PHYSICAL HAZARD | 0 |
| PERSONAL PROTECTION | A |
| Emergency Overview: Summarize the nature and appearance of the chemical and the important health hazards. | |
| <small>HMIS® © 2001 NPCA • Printed by J.R.K. • Norwalk, VT • 1-800-327-6668</small> | |

Quadro 5 – Exemplo da etiqueta do HMIS no quesito *Health* (saúde), *Flammability* (inflamabilidade), *Physical Hazard* (risco físico) e *Personal Protection* (EPI)
 Fonte: (EDSCO, 2002)

ANEXO 2 - Índice de EPI

| PERSONAL PROTECTION INDEX | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|
| A | |  | | | | G | |  +  +  | | | | | |
| B | |  +  | | | | H | |  +  +  +  | | | | | |
| C | |  +  +  | | | | I | |  +  +  | | | | | |
| D | |  +  +  | | | | J | |  +  +  +  | | | | | |
| E | |  +  +  | | | | K | |  +  +  +  | | | | | |
| F | |  +  +  +  | | | | X | | Consult your supervisor or S.O.P. for "SPECIAL" handling directions | | | | | |
| A  | | n  | | o  | | p  | | q  | | r  | | s  | |
| Safety Glasses | | Splash Goggles | | Face Shield & Eye Protection | | Gloves | | Boots | | Synthetic Apron | | Full Suit | |
| t  | | u  | | w  | | y  | | z  | | Additional Information | | | |
| Dust Respirator | | Vapor Respirator | | Dust & Vapor Respirator | | Full Face Respirator | | Airline Hood or Mask | | | | | |

Quadro 6 – Quadro com os índices de proteção pessoal – EPI

Fonte: (EDSCO, 2002)

ANEXO 3 - HMIS - Quadros de avaliação de risco

| HMIS HEALTH HAZARD RATING CHART | |
|---------------------------------|---|
| * CHRONIC HAZARD | Chronic (long-term) health effects may result repeated overexposure. |
| 0=MINIMAL HAZARD | No significant risk to health. |
| 1=SLIGHT HAZARD | Irritation or minor reversible injury possible. |
| 2=MODERATE HAZARD | Temporary or minor injury may occur. |
| 3=SERIOUS HAZARD | Major injury likely unless prompt action is taken and medical treatment is given. |
| 4=SEVERE HAZARD | Life-threatening, major or permanent damage may result from single or repeated overexposures. |

Quadro 7 – Quadro de classificação do índice *Health* (saúde) do HMIS.

Fonte: (EDSCO, 2002)

| HMIS FLAMMABILITY HAZARD RATING CHART | |
|---------------------------------------|--|
| 0=MINIMAL HAZARD | Materials that will not burn. |
| 1=SLIGHT HAZARD | Materials that must be preheated before ignition will occur. Includes liquids, solids and semi solids having a flash point above 200° F. (Class IIIB) |
| 2=MODERATE HAZARD | Materials which must be moderately heated or exposed to high ambient temperatures before ignition will occur. Includes liquids having a flash point at or above 100° F but below 200° F. (Classes II & IIIA) |
| 3=SERIOUS HAZARD | Materials capable of ignition under almost all normal temperature conditions. Includes flammable liquids with flash points below 73° F and boiling points above 100° F. as well as liquids with flash points between 73° F and 100° F. (Classes IB & IC) |
| 4=SEVERE HAZARD | Flammable gases, or very volatile flammable liquids with flash points below 73° F, and boiling points below 100° F. Materials may ignite spontaneously with air. (Class IA) |

Quadro 8 - Quadro de classificação do índice *Flammability* (inflamabilidade) do HMIS.

Fonte: (EDSCO, 2002)

| HMIS PHYSICAL HAZARD RATING CHART | |
|-----------------------------------|--|
| 0=MINIMAL HAZARD | Materials that are normally stable, under fire conditions and will not react to water, polymerize, decompose, condense or self react. |
| 1=SLIGHT HAZARD | Materials that are normally stable but can become unstable at high temperature and pressures. Materials may react non-violently with water or undergo hazardous polymerization in the absence of inhibitors. |
| 2=MODERATE HAZARD | Materials that are unstable and may undergo violent chemical change at normal temperature and pressure with low risk for explosion. Materials may react violently with water or form peroxides upon exposure to air. |
| 3=SERIOUS HAZARD | Materials that may form explosive mixtures with water are capable of detonation or explosive reaction in the presence of a strong initiating source or undergo chemical change at normal temperature and pressure with moderate risk of explosion. |
| 4=SEVERE HAZARD | Materials that are readily, capable of water reaction, detonation or explosive decomposition at normal temperatures and pressures. |

Quadro 9 - Quadro de classificação do índice *Physical Hazard* (risco físico) do HMIS.

Fonte: (EDSCO, 2002)